



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Kvázidiamágneses szupravezetős forgógép analízise

TDK dolgozat

Készítette: Hadur András

2014.10.20.

Tartalomjegyzék

1 Kvázidiamágneses motor (QDM).....	5
1.1 Bevezetés.....	5
1.2 A vizsgálati módszerről röviden.....	5
1.3 A kezdetek.....	6
1.4 A rotor alakjának hatása.....	7
2 A gerjesztés hatása.....	11
3 Réz sztátor:	13
3.1 Kapcsolt reluktancia jellegű gépek.....	13
3.1.1 Két lapátos elrendezés.....	14
3.1.2 Négy lapátos elrendezés.....	15
3.1.3 Nyomatékgörbék összehasonlítása:	16
3.2 Elosztott tekercselésű gerjesztés:.....	17
3.2.1 Két lapátos elrendezés.....	18
3.2.2 Négy lapátos elrendezés:	19
3.2.3 Nyomatékok összehasonlítása:	20
3.3 Szinuszos gerjesztés:.....	21
3.3.1 Két lapátos szinuszmezős elrendezés.....	22
3.3.2 Négy lapátos szinuszmezős elrendezés.....	23
3.3.3 Nyomatékok összehasonlítása:	24
3.3.4 Réz sztátorú gépek nyomatékainak összehasonlítása:	24
4 Szupravezető tekercs a sztátorban:.....	25
4.1 Kapcsolt reluktancia jellegű gép.....	25
4.1.1 Két lapátos elrendezés.....	25
4.1.2 Négy lapátos elrendezés:	26
4.1.3 Nyomatékgörbék összevetése:.....	27
4.2 Elosztott tekercselésű gép.....	28
4.2.1 Két lapátos elrendezés.....	28
4.2.2 Négy lapátos elrendezés:	29
4.2.3 Nyomatékok összehasonlítása:	29
4.3 Szinuszmezős gerjesztés:	30
4.3.1 Két lapátos elrendezés.....	31
4.3.2 Négy lapátos eset:	32

4.3.3 Szupravezető állórésztekerceselésű, szinuszos gerjesztésű gépek nyomatékának összehasonlítása:.....	32
4.4 Szupravezető állórésztekerceselésű gépek nyomatékainak összehasonlítása:.....	33
5 Alternatív elrendezésű gépek:	34
5.1 Patkómotor bevezetése.....	34
5.1.1 Hagyományos reluktancia gép modellezése:.....	34
5.1.2 Patkómotor vizsgálata	36
5.2 Rotorra ható erők vizsgálata a fluxusszálak kitérítése közben.....	37
6 Új konstrukció: tárcsa elrendezés	40
6.1 szalag hosszának változtatása:.....	43
6.2 A gerjesztőáram változtatása:.....	45
6.3 Légrés méretének változtatása:.....	46
7 A kísérletek bemutatása:	47
7.1 lapátkerekes kísérlet.....	47
7.2 Tömbi szupravezető kísérlet	47

Összefoglaló

Kutatási témám a kvázidiamágeses gép különböző elvi konstrukcióinak vizsgálata végeselemes szoftver segítségével. A bevezetőben ismertetem a vizsgálati módszert, a gép működésének elvét – a nyomaték keletkezésének okát, az elektromágeses térbe helyezett kvázidiamágeses anyag miatt keletkező taszító erőt -, majd a tapasztalt jelenségeket összevetem a hagyományos villamos gépek működése közben tapasztaltakkal. Ezt követően pedig felvázolok néhány lehetséges elvi konstrukciót a megvalósításhoz.

Bemutatom a kiindulási motormodellt, ismertetem az egyes elemek funkcióját, geometriai paramétereit, valamint az alkalmazott anyagok fizikai paramétereit.

Az egyes változatokat több szempont szerint is csoportosítom, például a gerjesztés típusa, a rotor geometriája, vagy a felhasznált anyagok szerint. Ezek alapján kétféle impulzusgerjesztésű, és egy szinuszos gerjesztésű változatot vizsgállok, valamint egy teljesen alternatív elrendezésű, axiális irányú gerjesztésű, tárcsa alakú elrendezést.

A rotor alakját tekintve azt vizsgáltam, hogy mekkora mértékben hat a kialakuló nyomatéokra az egyes geometriai paraméterek változtatása. Próbálom azonosítani a legfontosabb tervezési paramétereket.

A felhasznált anyagok szerint megkülönböztetek réztekerceselésű állórészsel, és II-es típusú szupravezető anyagból készült tekerceselésű állórészsel ellátott konstrukciót is. Ez azért fontos, mert ennek segítségével sokkal nagyobb árammal gerjeszthető az állórész, ami növeli a kvázidiamágeses gép nyomatékát. Ezen a ponton kitérek a vasmentes villamos gép konstrukciójának egy lehetséges megvalósítására. Az egyes konstrukciókat aszerint hasonlítom össze, hogy a nyomatékuk légrés menti eloszlása hogyan alakul.

Ezen felül bemutatom a témában elvégzett kísérleteket, melyekben a megépített kezdetleges motormodelleken igazolom a működési elv helyességét. Céлом, hogy a jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható szupravezetők felhasználásával megépítsem a kvázidiamágeses gép egy olyan prototípusát, amelyen már a nyomaték mérése is lehetséges, és az ezen végzett mérések segítségével alátámaszom az egyes szimulációk eredményét.

A munkám mostani szakasza arra szolgál, hogy az elvi változatok közül kiválasztásra kerüljön a megvalósítás és felhasználhatóság szempontjából legoptimálisabb változat, majd ezt követően további mérésekkel azonosítani tudjak a tervezés későbbi szakaszát segítő egyszerűsített formulákat.

Legtávolabbi célom egy működőképes, az iparban is használható gép megtervezése és legyártása. Első sorban egy a villamosenergia-rendszerhez illeszthető, jó hatásfokú lendkerekes energiatároló rendszer fejlesztése a cél.

Abstract

In my research project, I investigate the behaviour of the quasi-diamagnetic machine theoretical constructions with finite-element method simulations. In the introduction I present the method of the investigation, the behaviour of the machine – the cause of the generated torque, the generated repulsive force by setting quasi-diamagnetic material near the electromagnetic field -, then I compare the experienced phenomenon with other, conventional electrical machine's phenomenons. After this, I sketch a few optional theoretical constructions.

I present my initial motor model, describe the function of the elements, geometrical parameters and the physical parameters of the used materials.

We can tabulate these versions by many aspects, for example: the type of the excitation, the rotor geometry, used materials. I investigate two types of pulse excited and one type sinusoidally excited machine and a fourth tire type, axially excited model.

Including the rotor geometry I investigated that how the generated torque affects by changing the different rotor parameters. I'm trying to identify the most important parameters of design.

From the aspect of the used materials I distinguish copper and Type II high-temperature super-conducting material winding stator. That's important, because by the usage of this material, the stator can be excited with higher current, which increases the torque of the and it is possible to reach bigger external magnetic field in the air gap which increases the torque of the quasi-diamagnetic machine. At this point, I present one of the possible implementation of the ironless electrical machine. I compare the constructions in the aspect of how the torque changes along the gap.

Moreover I present the experiments which were investigated with primitive models of the quasi-diamagnetic machine to prove the theory. My further goal is to use commercially available superconductors to build a prototype of the quasi-diamagnetic machine, where I can measure the torque to prove the results of my simulations.

At this phase of my work, I try to select the most optimal, efficient and feasible concept of the quasi-diamagnetic machine, then identify formulae by measurement to assist the further design.

The final goal of my project is to design and manufacture a functional machine, which can be used in industrial applications. Primarily a high efficient flywheel energy storage system is the goal, which can be connected to the power system.

1 Kvázidiamágneses motor (QDM)

1.1 Bevezetés

A kvázi diamágneses motor (QDM) egy olyan villamos gép, melynek forgórésze II-es típusú szupravezetőt tartalmaz, amely nem engedi magába a mágneses teret, ennek révén – a hagyományos villamos gépekkel ellentétben – nem a mágneses vonzó erőt, hanem a taszító erőt használja nyomatékképzésre, az állórész tekercsek mágneses terének hatására. [1] A gép működési elvét Dr. Vajda István dolgozta ki, jómagam 2013 szeptemberében csatlakoztam a kutatáshoz. Az én feladatomban a FEMM-nevű véges elemes szoftverben végzett szimulációk révén a QDM belsejében a mágneses tér, valamint a nyomaték alakulásának tanulmányozása, a rotor illetve sztátor különböző kialakításainak vizsgálata, összefüggések és hatékonyabb konstrukció keresése a majdani optimalizáláshoz. A kutatómunkámat egy „Egyetemi műhely”-nek nevezett csapat tagjaként végeztem, melynek tagja volt még Rácz Árpád (BME, phd), valamint Pusztai Máté (BME, bsc), akikkel az elméletet igazolandó szupravezető labor kísérleteket végeztük. A beszámoló további részében bemutatom a feladat rám eső részében honnan indultam, a megközelítőleg 200 lefuttatott szimulációm révén miként léptem tovább, és milyen megfontolások, következtetések illetve kísérleti eredmények vezettek oda, hogy jelenlegi megállapításaimat kijelentsem.

1.2 A vizsgálati módszerről röviden

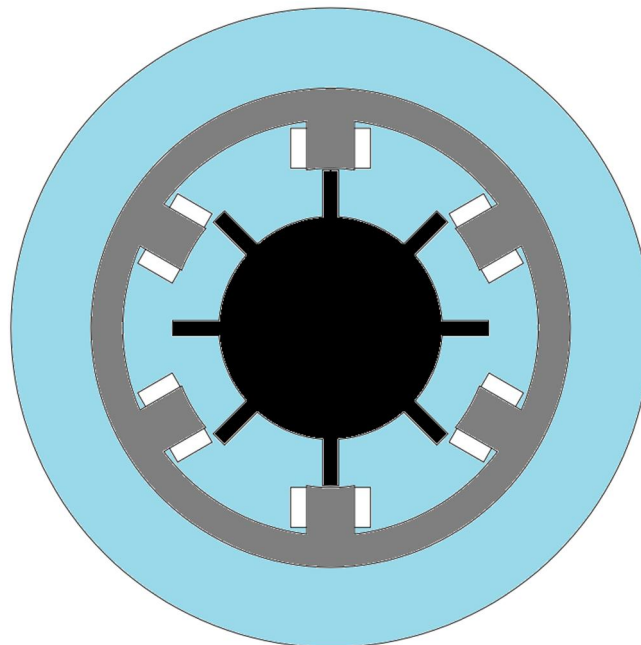
A FEMM véges elemes szoftver, amiben a mágneses tér szimulációját végeztem, alkalmas a kívánt összeállítás vázlatának megrajzolására, de kényelmi okokból, a rajzot inkább Autocad 2007-ben készítettem, mert a rajz kimenthető .dxf formátumban, ami importálható a FEMM-be. A vázlat importálása, és a mértékegységrendszer egyeztetése után a használandó anyagok tulajdonságainak definiálása következik. A felhasznált anyagok definiálása előtt még megjegyzem, hogy a szoftver adatbázisa el tudja tárolni a definiált anyagokat, így az általam létrehozott könyvtárból közvetlenül importálható az adott projektekbe is, így elegendő minden anyagot egyszer definiálni, és onnantól tetszőlegesen felhasználhatóak. Az anyagokat az alábbi ábra kapcsán ismertetem. Az alapkonstrukcióban az állórész anyaga M-19-es acél, a tekercsek pedig rézből vannak, ezen anyagokat a normál fizikai paramétereikkel vettem figyelembe, melyeket a szoftver adatbázisa eleve tartalmazott. Ugyancsak valós paramétereivel vettem figyelembe a levegőt, ami a szimulációban a légrés kitöltésére szolgál, ezen kívül még az állórész körüli tér egy részében sem elhanyagolható, mivel az acélból esetlegesen kilépő tér alakulása is lényeges felhasználói szempontból. Az igazi trükk a szupravezető anyag definiálása. Elméletileg a mágneses tér nem hatol be a szupravezető anyag belsejébe, tehát az anyagban mindenhol 0 a tér, amit 0 permeabilitás megadásával lehetne csak definiálni, de a szoftver a számításaiban nem tud 0-val osztani, úgyhogy itt egy közelítésre lesz szükségünk. Ez a gyakorlatban 10^{-6} relatív permeabilitású szupravezető anyag definiálását jelentette. A témavezetőm tanácsára 10^{-8} MS/m vezetőképesség beállításával futtattam a szimulációkat. A tekercsek gerjesztésének

modellezéséhez további trükkökhöz kell folyamodni, esetünkben azt a megoldást választottuk, hogy nagy árammal átjárt egy menetű tekercset használtunk. A gerjesztett tekercsnél az elmesztett menetek közül az egyiknél a felületbe befelé, a másiknál a felületből kifelé mutató irányultságú áram beállításával, melynek abszolútértéke 20 A/mm^2 , így módon egy konstans gerjesztéssel szimulálható az impulzus üzem.

A szimuláció futtatása során a gerjesztés hatására felépülő mágneses mező nyomatóképző hatását vizsgálom. Ez a szimulációban gyakorlatilag pont fordítva történik, mint ahogy a valóságban, vagyis nem a tér forgatja el a forgórészt, hanem a forgórész egységnyi szöggel (1°) történő elforgatása után újra kiszámítjuk a szoftverrel a teret, és a nyomatóképző hatását a forgórészre. Az így kapott nyomatók adatokat egy txt-fájlba menti a szoftver, amiből utána táblázatkezelő szoftver (Microsoft Excel) segítségével az adathalmaznál lényegesen informatívabb nyomatókgörbökké alakíthatunk, amiből már következtethetünk egy adott konstrukció előnyeire/hibáira. Ezen felül a szoftver még alkalmas a H térerősség és a B indukció erővonalainak vizuális megjelenítésére is, ezek is kimenthetők, ezeket minden szimuláció után egy rövid animációvá fűztem össze. (A Windows Movie Maker program segítségével.)

1.3 A kezdetek

Az alap konstrukciót Rác Árpád cikke alapján [1] építettem fel, és futtattam le.



1.1. ábra: A képen kék színnel szerepel a levegő, szürkével az M-19-es acél, fehérrel a réztekercsek, és feketével a szupravezetőt jelölöm

Ennél a 6 tekercses konstrukciónál a gerjesztés egyszerre két tekercssel történt, egészen pontosan az ábrán a 12 óránál, és 6 óránál lévő tekercsek egyidejű

impulzusgerjesztésével. A gerjesztés ilyen módja leginkább a kapcsolt reluktancia gépekre jellemző, végső soron a QDM is egy reluktancia gép, szigorúan véve „antireluktancia” gép.

1.4 A rotor alakjának hatása

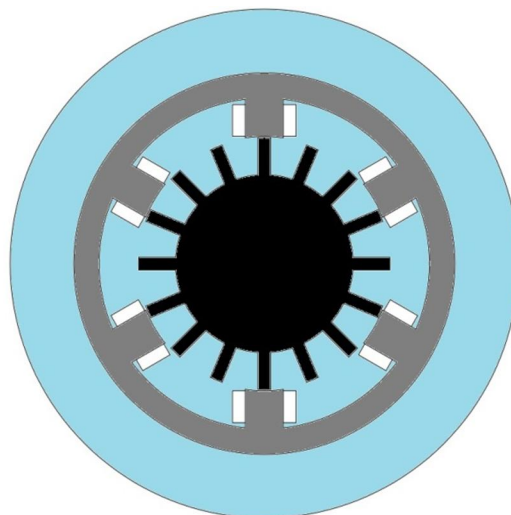
Érdeemes olyan alakú rotort alkalmazni, amely egyes paramétereinek megváltoztatásával egyértelmű korrelációt mutat a nyomaték változása. *Ezen szimulációkban megpróbálok olyan rotor geometriát létrehozni, amelyben növelem az aktív felületet, ezáltal a keletkező nyomatékokot.*

Először tisztázni kell a lapát szó fogalmát: A szó igazi értelmében a rotoron nincsenek pólusok, hanem sokkal inkább az „antipólus” név lenne találó, ugyanis amikor ezek a szupravezető „lapátok” közelítenek a gerjesztett állórész tekercséhez, azokban olyan irányú áramok indukálódnak, hogy taszítani kezdik egymást. Ebből következik, hogy a gép egy egyensúlyi állapotában a rotor egy olyan szöghelyzetét veszi fel, hogy az antipólusok a lehető legtávolabb helyezkedjenek el a gerjesztett állórész pólustól. A továbbiakban a rotor antipólusait is egyszerűen lapát néven fogom említeni a „pólus” szó redundanciájának elkerülése érdekében.

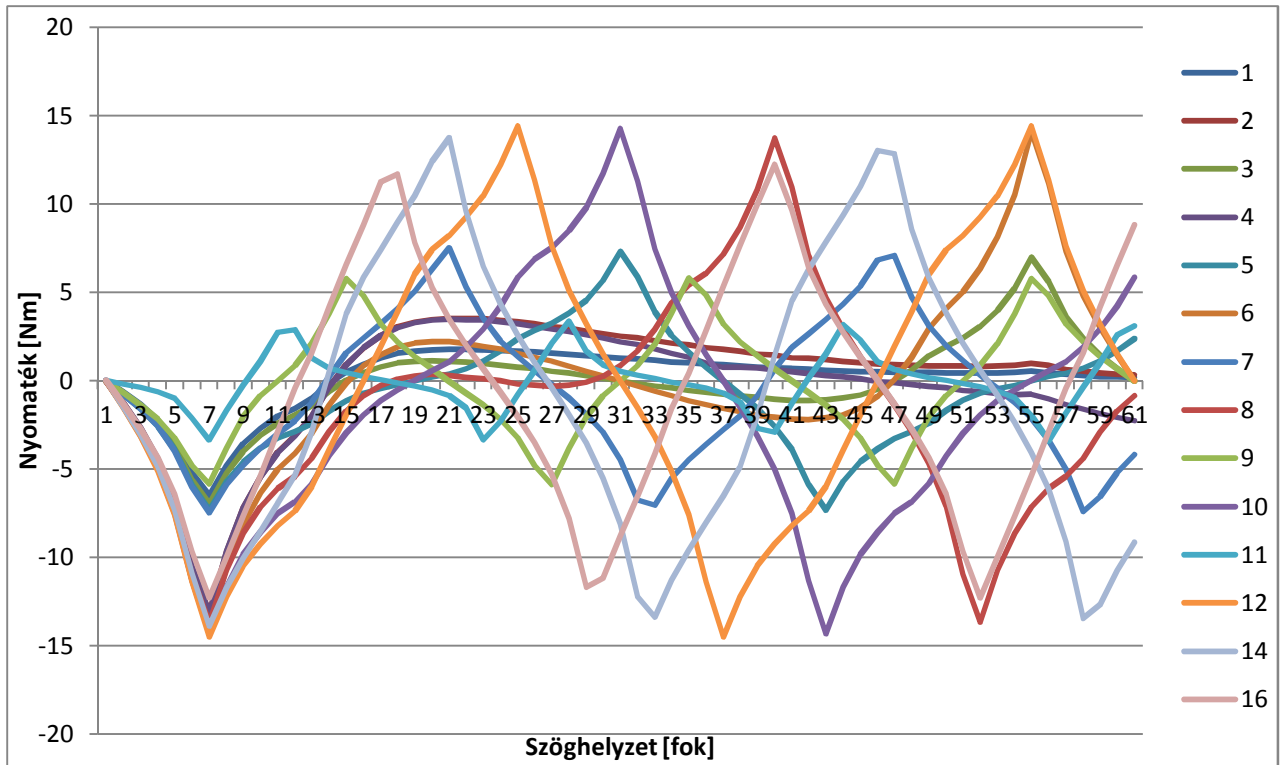
Munkám első szakaszában a mágneses térbe helyezett szupravezető rotor különböző geometriai paramétereit változtattam, és ennek a forgatónyomatékra való hatását vizsgáltam az egyes eseteket külön minden szöghelyzetben. A következő paraméterek változtatását vizsgálom:

- lapátszám
- lapátszélesség
- sugárárány

Ismét az alapkonstrukció a kiindulási modell, azonban az egymást követő modellekben sorra növeltem a lapátok számát egészen 16-ig, ahol már egyértelműen a nyomaték csökkenése volt megfigyelhető:



1.2. ábra: A képen a 16 lapátos lapátkerék alakú rotor látható



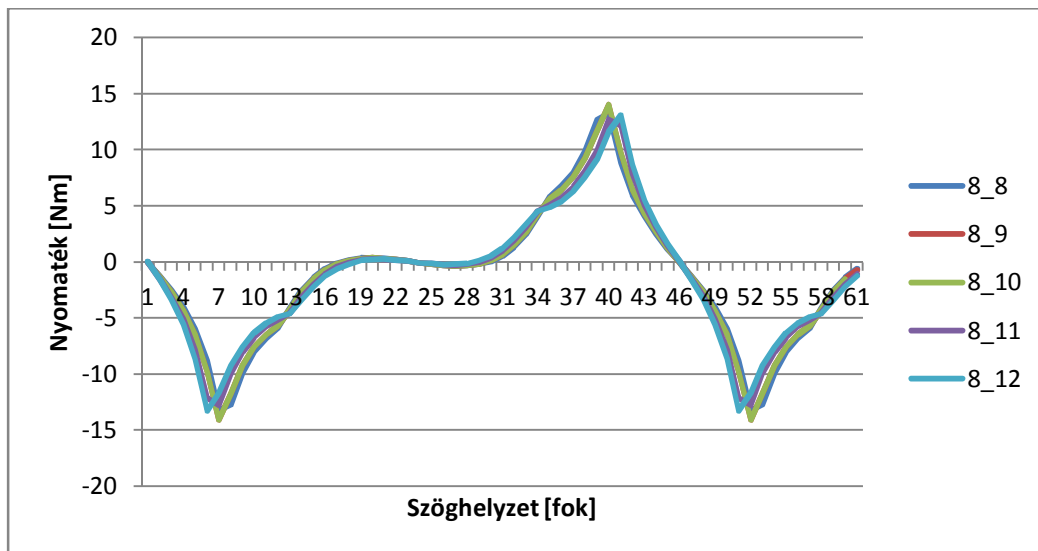
1.3. ábra: Az egyes lapátszámokhoz tartozó nyomatékgörbék

A nyomatékgörbékéből két komoly következtetést lehet levonni:

-Páratlan számú lapát alkalmazása ezen gerjesztés esetén célszerűtlen, mert lerontja a nyomatékot a gerjesztett ellennyomaték.

-12-nél nagyobb lapátszám alkalmazása már csökkenti a maximális nyomatékot, ezért csak ennél alacsonyabb lapátszámot érdemes alkalmazni.

A következő paraméter a lapátok szélességének változtatása volt:

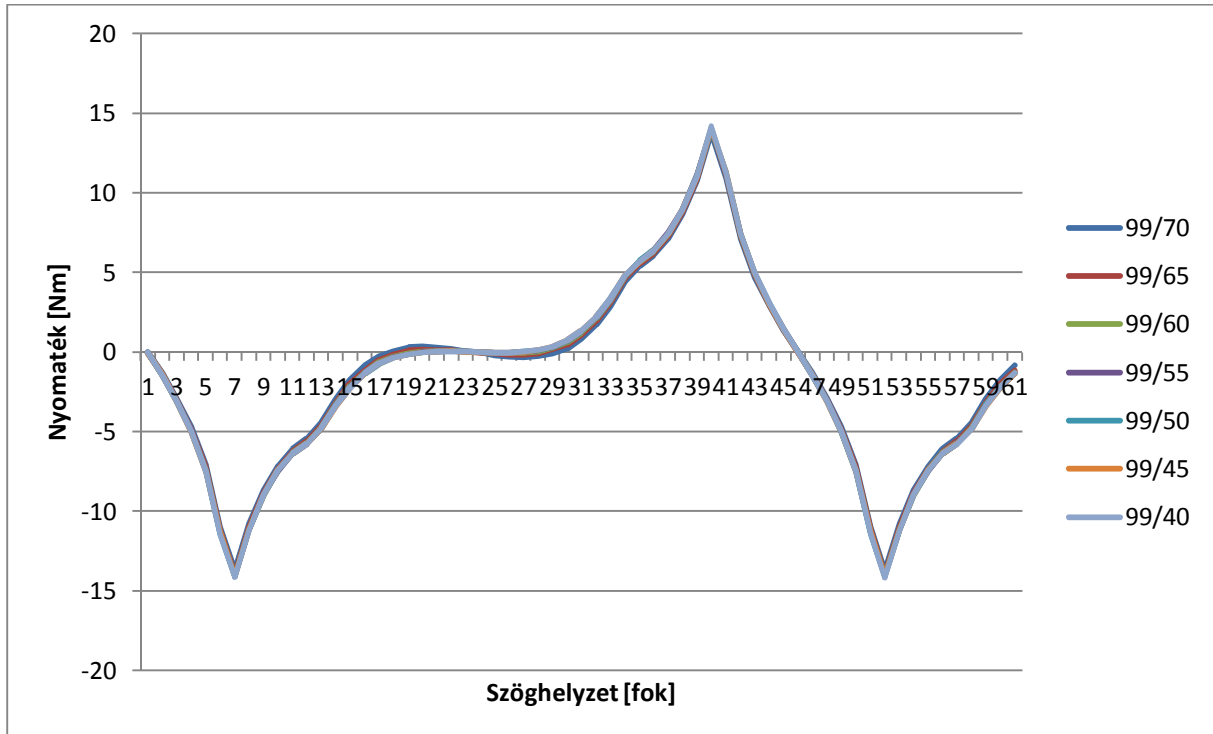


1.4. ábra: A lapátszélesség hatása a nyomatékra

A nyolclapátos konstrukción a lapátok szélességét kezdtem változtatni milliméterenként pozitív és negatív irányba is egyaránt, de a várt nyomatékcúcs növekedés elmaradt, elmondható:

A lapátszélesség nem lényeges paraméter.

Ezt követően a külső/belső sugár arányának változtatásának nyomatékgörbére vett hatását vizsgáltam. A lapátkerék lapátjai lábkörének sugarát növeltem, illetve csökkentettem 5 milliméterenként, szintén a nyolclapátos konstrukciót véve alapul:



1.5. ábra: Belső sugár hatása a nyomatéokra

Az vizsgálat azonban még az előző vizsgálatnál is csekélyebb eredménnyel szolgált:

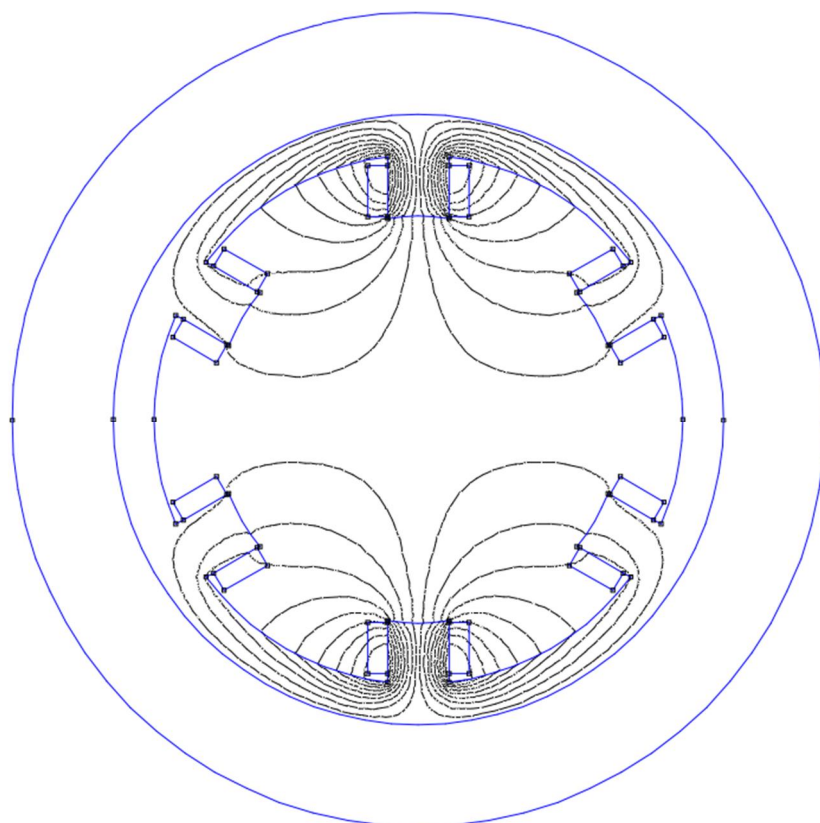
A sugárarány még kevésbé lényeges paraméter, mint a lapátszélesség.

Az eddigi szimulációk alapján még nem dönthető el egyértelműen, hogy az adott paraméterek mennyire lényegesek, avagy nem, mivel egyelőre csak a nyolclapátos konstrukción sikerült lefuttatni a szimulációkat, valamint csak mindegyik esetben azonos típusú gerjesztést alkalmaztam.

Ami azonban egyértelmű: ezen paraméterek változtatásával nem érhető el lényeges növekedés a nyomatékcúcsban, inkább csak a léptető módban vezérelt QDM finomhangolására szolgálnak. Ha a nyomaték nagyságrendi növekedését szeretnénk elérni, akkor azt leginkább a gerjesztés módjának megváltoztatásával érhetjük el.

Mielőtt azonban továbbmennék, fontos lenne egy kicsit ténylegesen „megnézni” azt a mágneses teret, ami az adott gerjesztés esetén a villamos gép belsejében keletkezik:

A mellékelt ábrán látható, hogy a tekercs menetei körüli térbe szórt fluxus az, ami hajtja a rotort, tehát ha az állórész elrendezést úgy változtatnánk meg, hogy ez a fluxusa ne szimmetrikusan hasson a forgórészre, akkor elképzelhető, hogy a nyomatékmaximum növekedése következne be.



1.6. ábra: Mágneses tér erővonalainak alakulása rotor nélküli esetben

Tehát az új irány nem más, mint a gerjesztés megváltoztatása. Az első kísérleteim ebben az irányban a szimmetriasík megbontásával kezdődtek, vagyis a gerjesztett tekercsokat nem a függőleges szimmetriasík tengelyén helyeztem el, hanem attól eltolva, azonban ezek a nyomaték csökkenéséhez vezettek, úgyhogy más oldalról kezdtem megközelíteni a gerjesztést, mégpedig a légrés menti eloszlás szempontjából

2 A gerjesztés hatása

A koncepciók felvázolása után létrehoztam két modellt, amin az összes gerjesztéstípussal vizsgálható a nyomaték alakulása , és a nyomatékgörbék így összehasonlíthatóvá válnak [2].

A gerjesztés típusa szempontjából szempontjából megkülönböztethető:

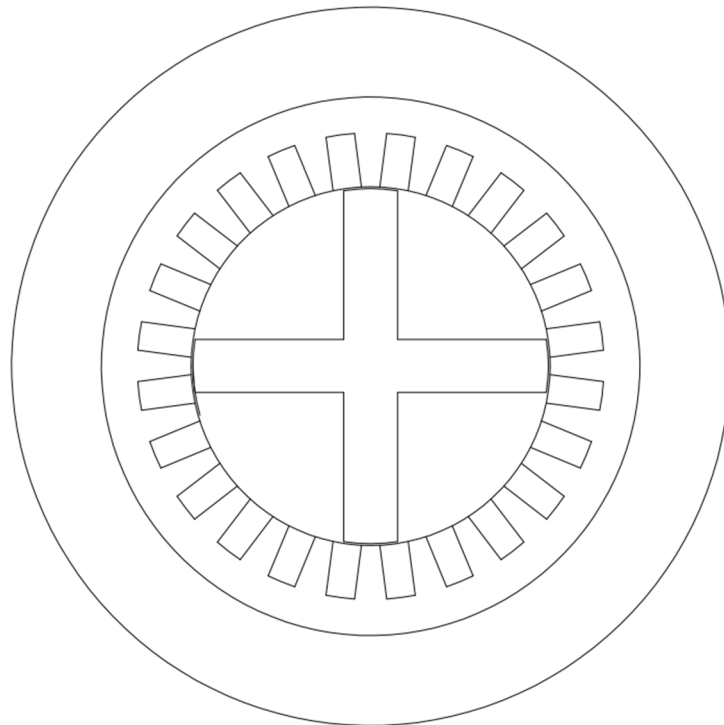
- Kapcsolt reluktancia jellegű gép (toroidális mágneses terű)
- Elosztott tekercselésű szinkron jellegű gép (koncentrikus terű)
- Szinuszműködésű szinkron reluktancia jellegű gép

A gerjesztés mértéke szempontjából:

- A sztátoron réz tekercselésű konstrukció
- A sztátoron szupravezető tekercseket tartalmazó konstrukció

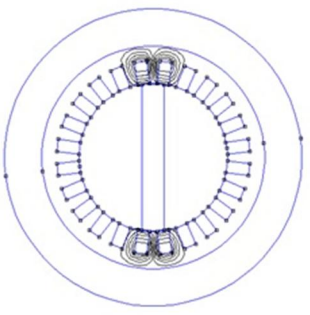
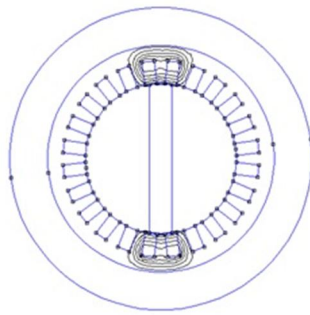
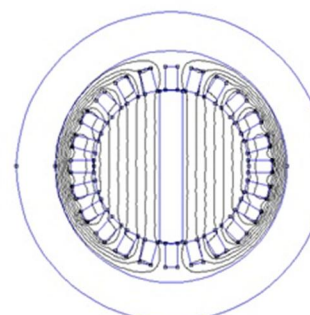
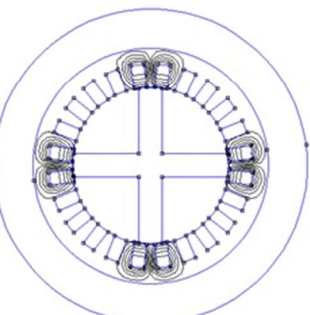
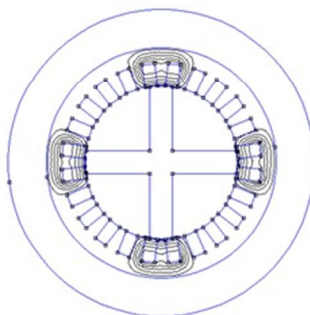
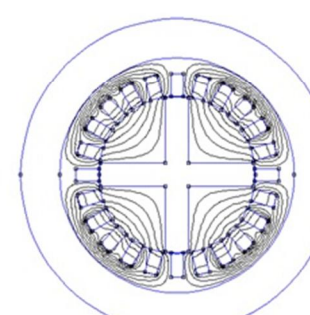
A lapátszám szempontjából:

- Két lapátos
- Négy lapátos



2.1. ábra: A vizsgált négy lapátos konstrukció

A fentebb ismertetett szempontok alapján létrehoztam egy táblázatot a jobb áttekinthetőség érdekében:

		Réz tekercselés az állórészen		
		Kapcsolt reluktancia üzemű	Elosztott tekercselésű	Színusz mezős
Két lapát				
Négy lapát				

2.2. ábra: Rendszerező táblázat az egyes gépkonstrukciókhoz

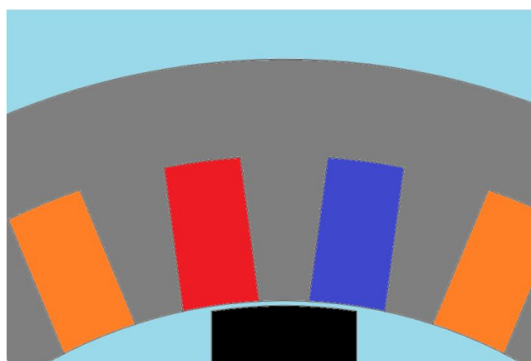
Ezen a táblázatban ezúttal olyan képekkel töltöttem fel, melyeken látszik az egyes gépekben kialakuló erővonalak szerkezete. Szeretném felhívni a figyelmet, hogy a szupravezető tekercselésű változatoknak is hasonló az erőtere a táblázatban feltüntetett réztekercselésű állórésű gépek teréhez, csak a nagyobb gerjesztés miatt sűrűbbek az erővonalak, a későbbiekben ismertetem a különbséget.

Az eltérő típusú gerjesztésektől ismertetési sorrendben haladva egyre nagyobb nyomatékcúcsot várok.

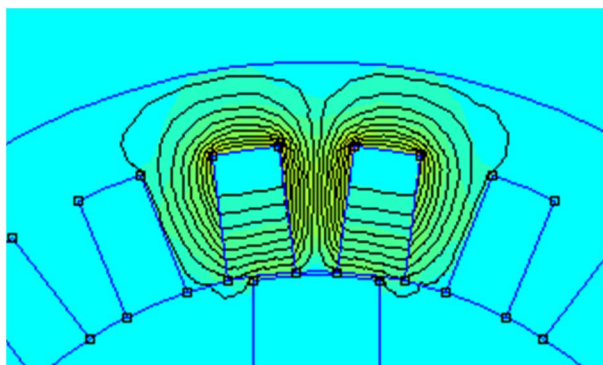
3 Réz sztátor:

3.1 Kapcsolt reluktancia jellegű gépek

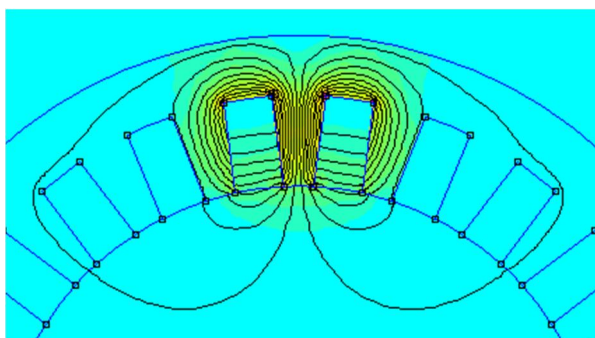
Ezen típusú gerjesztés esetén közvetlenül egymás mellett lévő meneteket ellentétes irányú gerjesztőárammal táplálók (ezen gerjesztéssel vizsgáltam a rotor geometriájának hatását a nyomatékra). Ezen gerjesztési módban a QDM kapcsolt reluktancia gépként viselkedik, mintha a kerület mentén 12 különálló tekercset helyeztem volna el.



3.1. ábra: A gerjesztőáram iránya a felületbe befelé (piros) illetve kifelé (kék) mutat, a sárga színű menetek gerjesztetlenek.



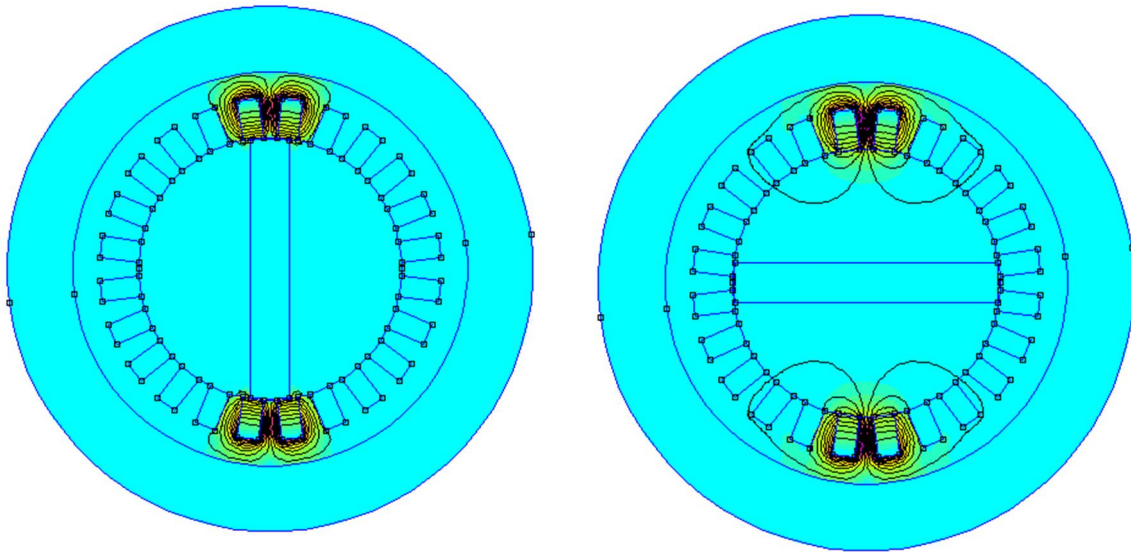
3.2. ábra: Az erővonalak alakja közeli forgórész lapát esetén



3.3. ábra: Az erővonalak alakja a forgórész lapát távoli helyzetében

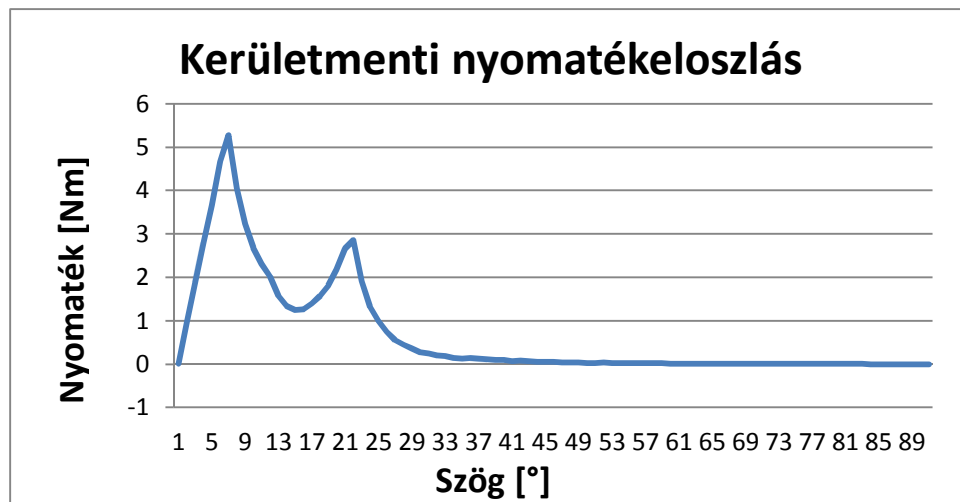
3.1.1 Két lapátos elrendezés

Ezen elrendezésnél a forgórész két lapátot tartalmaz, a gerjesztés a fentebb ismertetett típusú.



3.4. ábra: Kapcsolt reluktancia jellegű két lapátos gép erővonal szerkezete instabil és stabil egyensúlyi helyzetben

Nyomatékgörbe:

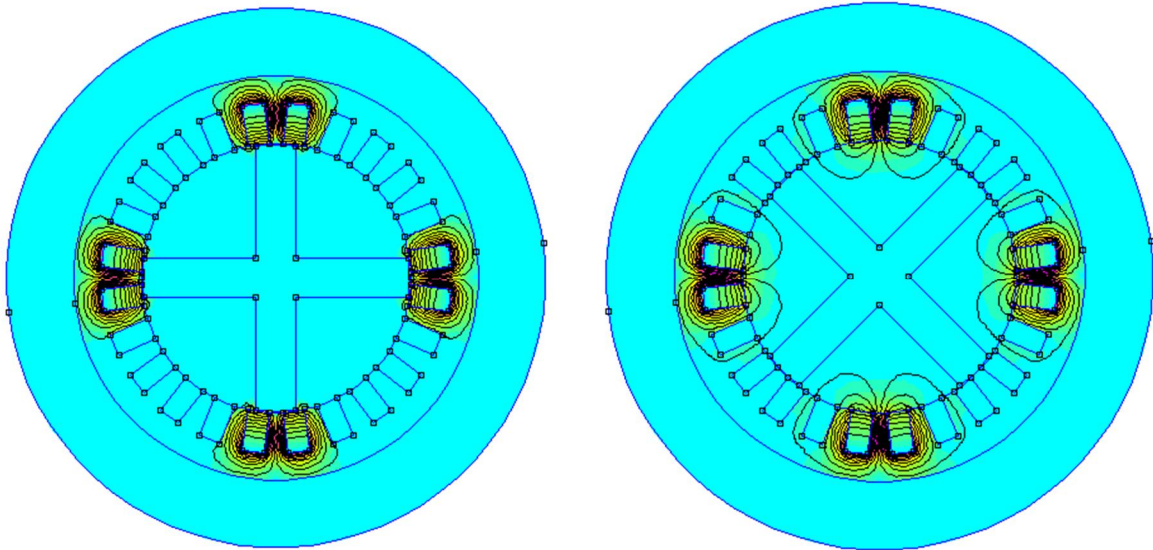


3.5. ábra: Réz állórésztekerceselésű kapcsolt reluktancia jellegű két lapátos gép nyomatékgörbéje

3.1.2 Négy lapátos elrendezés

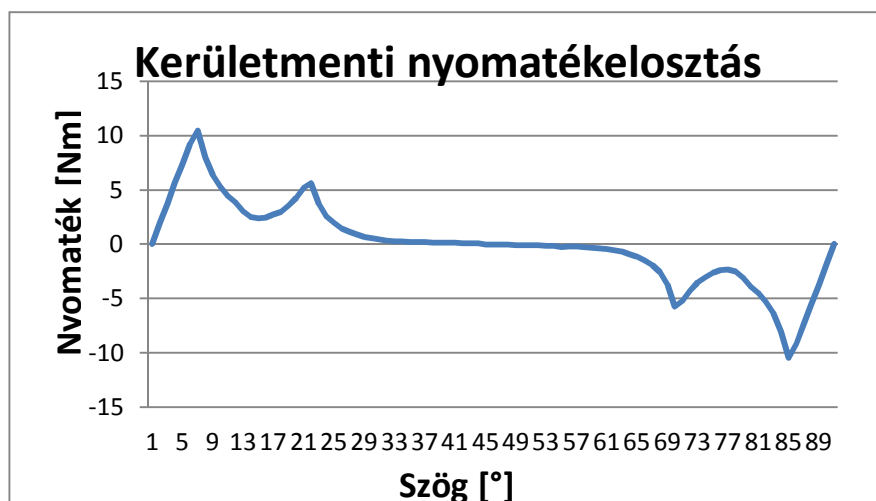
Négy lapátos elrendezés esetén azt vizsgálom, hogy miként befolyásolja a nyomatókót a lapátszám növelése. Főként a nyomatókgörbe azon szakasza érdekes, ahol a következő lapát közelít a gerjesztett tekercsekhez.

A lapátszám növeléstől növekvő nyomatókót várok.



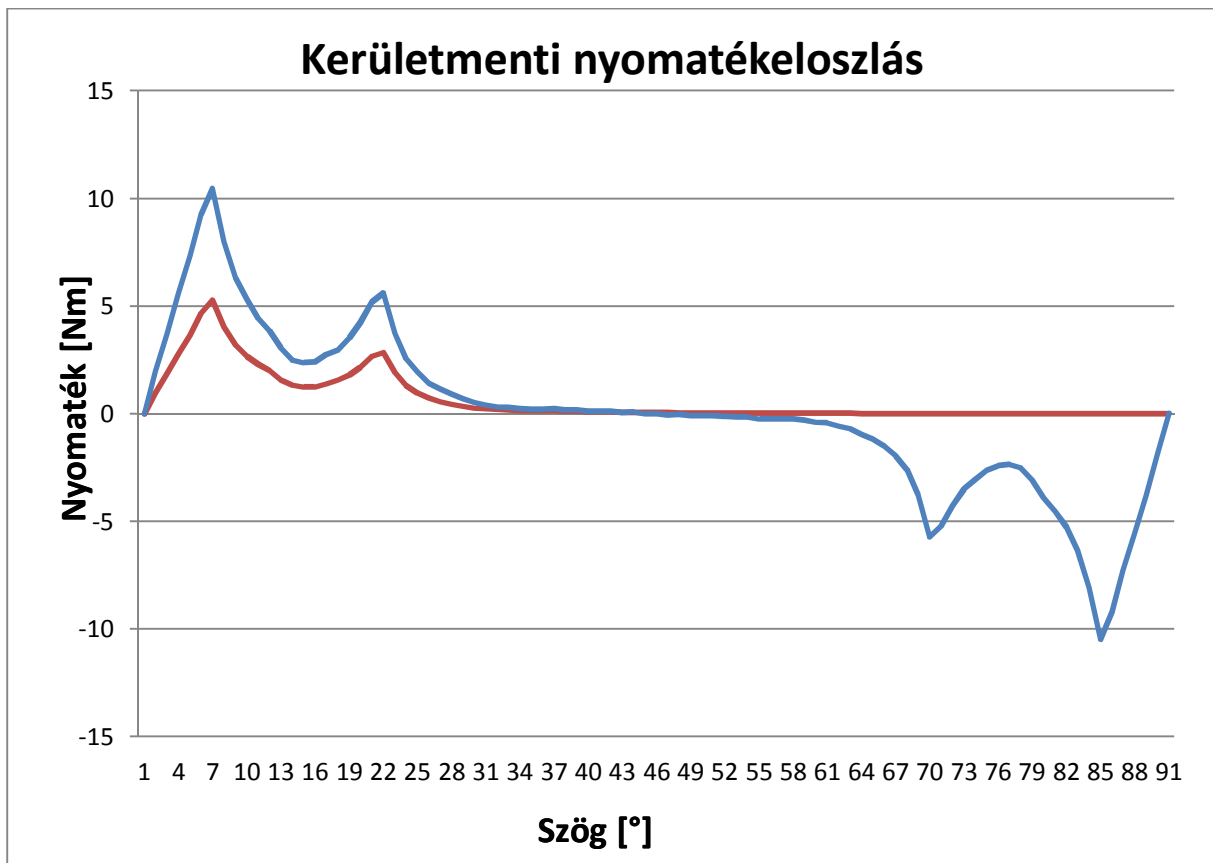
3.6. ábra: Kapcsolt reluktancia jellegű négy lapátos gép erővonal szerkezete instabil, és stabil egyensúlyi helyzetben

Nyomatókgörbe:



3.7. ábra: Réz állórész tekercselésű, A-típusú gerjesztésű gép nyomatókgörbéje, négy lapátos elrendezés esetén

3.1.3 Nyomatékgörbék összehasonlítása:



3.8. ábra: Kapcsolt reluktancia jellegű, két (piros) és négy (kék) lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

A két és a négy lapátos konstrukció nyomatékgörbéit összehasonlítva megállapítható:

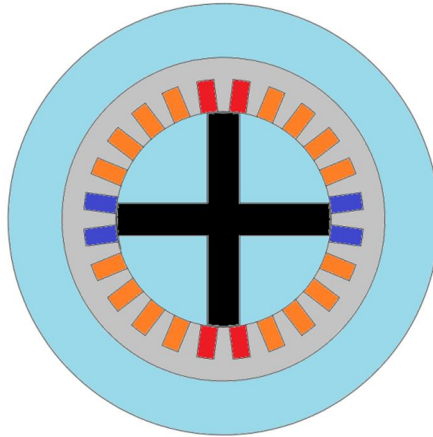
-A nyomatékcúcs kétszeresére növekszik kétszer annyi lapát használatával.

- A villamos periódus a felére csökken, hiszen négy lapát esetén már 45°-os fordulat után lassító nyomaték kezd el hatni a rotorra, tehát ez után már mindenképp ki kell kapcsolni a gerjesztőtekerceszt.

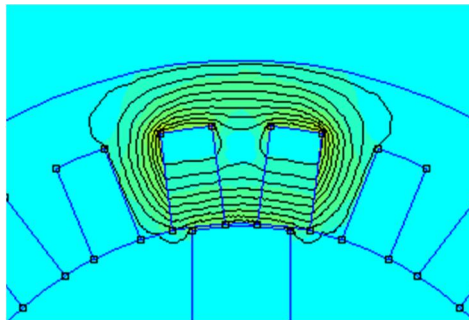
Megjegyzés: Ezen konstrukció szokatlanak tűnhet elsőre, mivel nem triviális, hogy a két gerjesztőáram miatt halad ellentétes irányba, ráadásul úgy, hogy ilyen közel vannak egymáshoz. Az elgondolás alapját az képezte, hogy kezdetekben egy „laposabb” konstrukciót vizsgáltam, aminek az axiális irányú mérete elmaradt az átmérőhöz képest, kvázi tárcsa motorként, és ezt a változatot lehet úgy gerjeszteni, hogy az adott fogak köré szolenoidális tekercseket helyezünk el. Ilyen tekercsek hozzák létre a 3.4.ábrán és a 3.6.ábrán látható erővonalképet.

3.2 Elosztott tekercselésű gerjesztés:

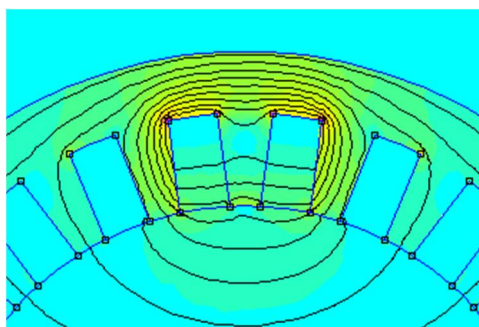
Ezen gerjesztéstípusnál a közvetlenül egymás mellett elhelyezkedő tekercsmenetek egyező irányú gerjesztőárammal vannak táplálva, az egymástól mechanikailag 90° -ra elhelyezett menetek tartoznak azonos tekercseléshez. Ez azért fontos, mert több menetet táplálva nagyobb nyomaték érhető el. A QDM ezen gerjesztés hatására hasonlóan viselkedik, mint a szinkron reluktancia gépek. (Megjegyzés: A később ismertetett szinuszos gerjesztés is ennek a továbbfejlesztett változata, de ott az egyes menetekben nem egyenlő a gerjesztőáram.)



3.9. ábra: Elosztott tekercselésű gerjesztés: az egyes menetekben a gerjesztőáram iránya a lap síkjába befelé (piros) illetve kifelé (kék) mutat, a sárga színűek gerjesztetlenek

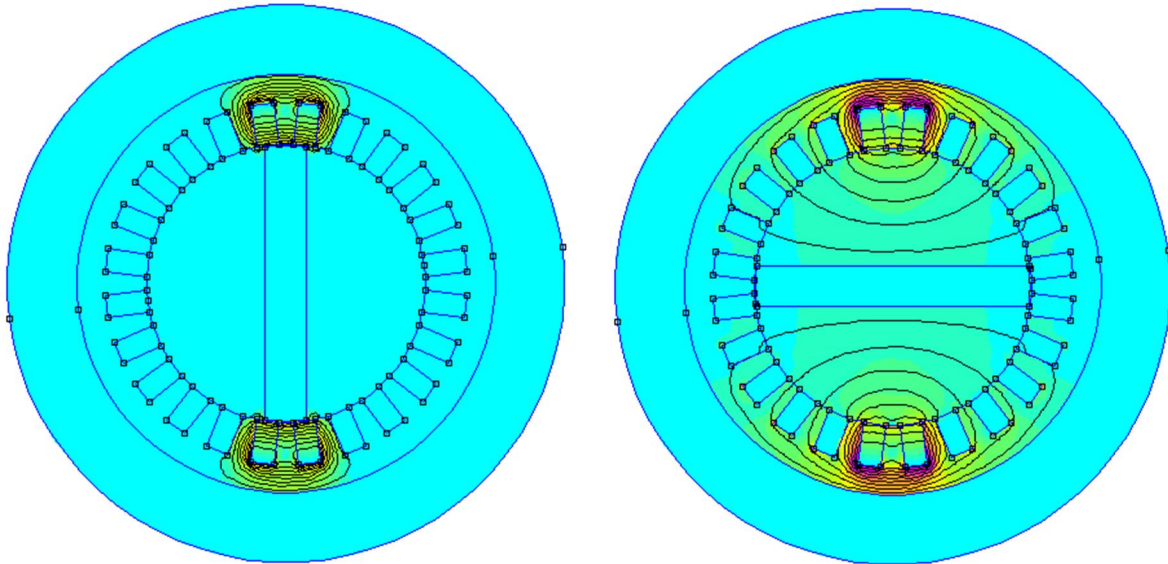


3.10. ábra: Az erővonalkép a forgórész lapátjának közeli helyzetében



3.11. ábra: Az erővonalkép a forgórész lapátjának távoli helyzetében

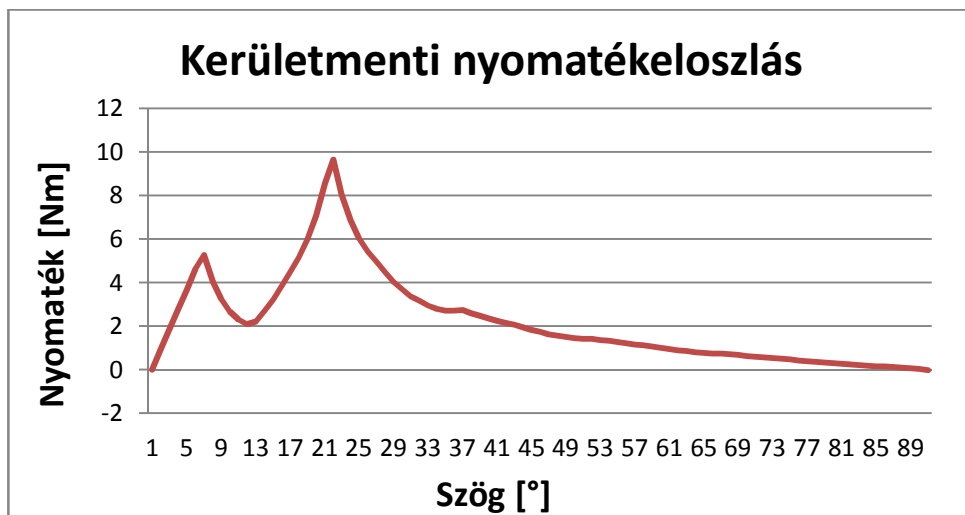
3.2.1 Két lapátos elrendezés



3.12. ábra: Elosztott tekercselésű két lapátos gép erővonal szerkezete instabil és stabil egyensúlyi állapotban

Az egy tekercseléshez tartozó menetek mechanikailag 180° -ra vannak egymástól, a két gerjesztett rézvezetőben azonos irányba folyik az áram (12 óránál befelé, 6 óránál kifelé). Ennél az összeállításnál azt vizsgálom, hogy miként reagál a szupravezető tömb, ha nem csak egy tekercsre adok gerjesztést. Elmondható, hogy a nyomaték növekszik. A telítés miatt az elrendezés további vizsgálatot igényel.

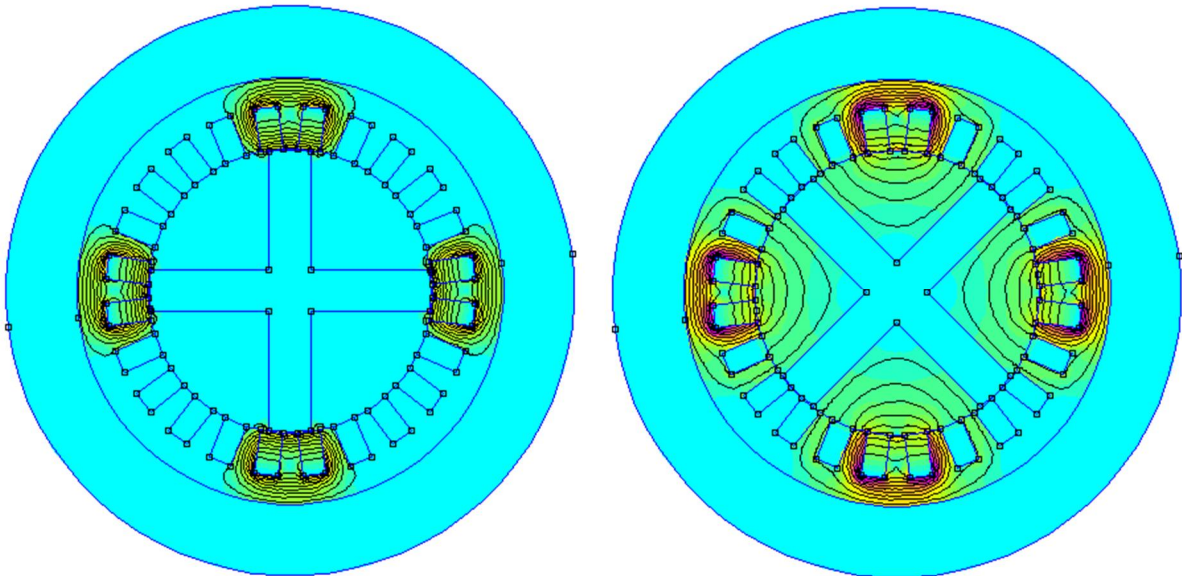
Nyomatékgörbe:



3.13. ábra: Elosztott tekercselésű két lapátos gép nyomatékgörbéje

(Itt szeretném felhívni a figyelmet, hogy a réz vezetők képesek áthaladni az erővonalak, majd a szupravezetős konstrukciónál látni fogjuk, hogy ott nem így van.)

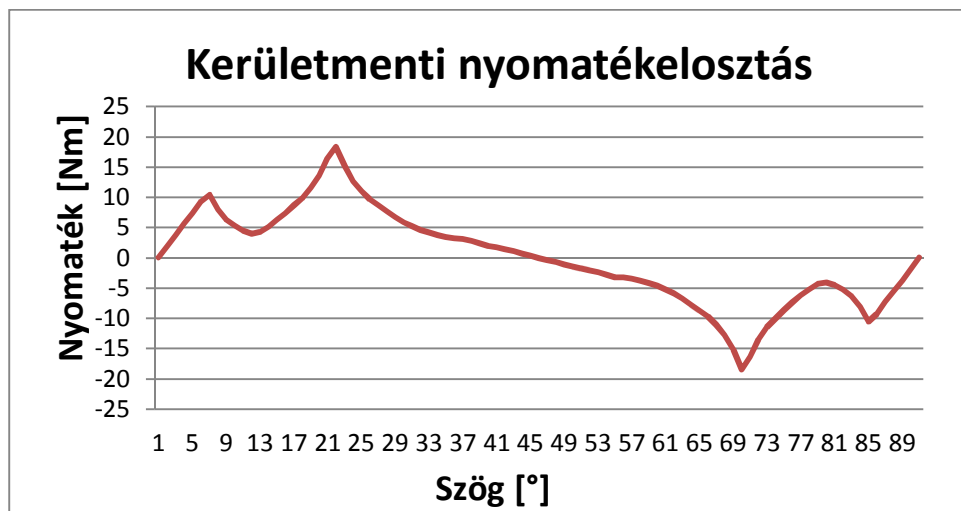
3.2.2 Négy lapátos elrendezés:



3.14. ábra: Elosztott tekercselésű négy lapátos gép erővonal szerkezete instabil és stabil egyensúlyi állapotban

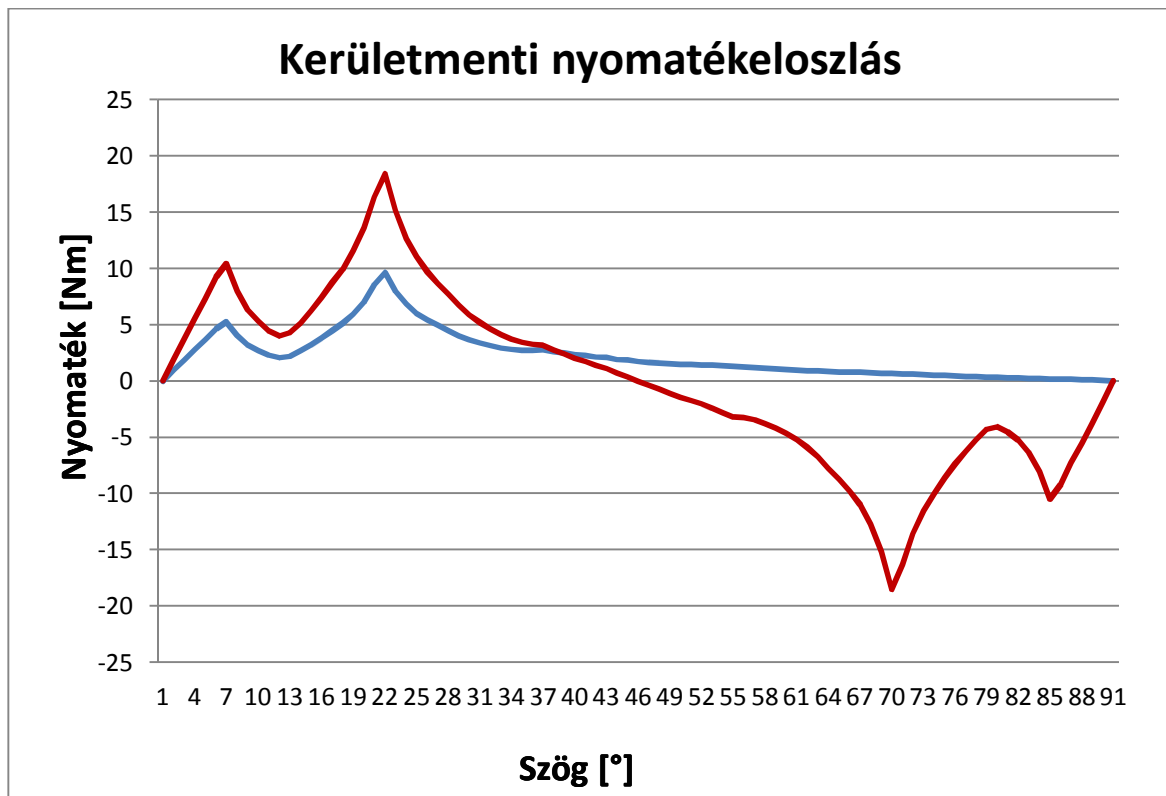
Ez az elrendezés csak a forgórészen elhelyezett lapátok számában tér el a korábbtól. A vizsgálat célja az volt, hogy az erővonalak alakulását megfigyeljük, mert feltételezhető, hogy egy lassító nyomaték lép fel, ami, mint látni fogjuk, tényleg megjelenik.

Nyomatékgörbe:



3.15. ábra: Elosztott tekercselésű négy lapátos gép nyomatékgörbéje

3.2.3 Nyomatékok összehasonlítása:



3.16. ábra: Réz állórész tekercselésű elosztott tekercselésű gépek nyomatékgörbéi:

két lapátos (kék) és négy lapátos (piros) elrendezés

Megállapítható, hogy:

- A maximális nyomaték kb. 18 Nm, ebből látható, hogy **a lapátok számának kétszerezése egyben a nyomatékcúcsok duplázódását is jelenti**, a jelenség teljesen ekvivalens a reluktancia gépeknél a póluspárok kétszerezésénél tapasztalhatóval.
- **A nyomatékcúcs nagyobb, mint a kapcsolt reluktancia jellegű gerjesztés esetén.**

3.3 Szinuszos gerjesztés:

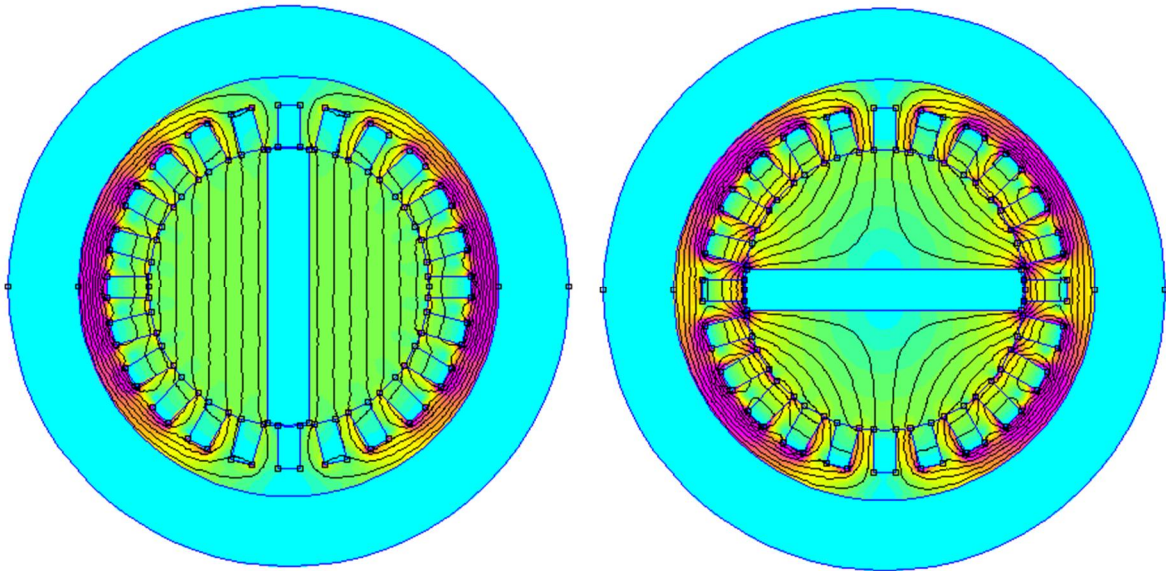
A modell továbbra is a régi, a gerjesztés azonban más, ha úgy vesszük, az előző kibővített változata. Az elosztott tekercselésű gép gerjesztésénél csak az állórész egy pontját gerjesztettük, itt azonban a kerület mentén mindenhol gerjesztve van a gép, mintegy homogén erőteret létrehozva a gép belsejében. Megjegyzés: a FEMM-ben nem lehet szinuszos gerjesztést megadni, ezt egy olyan trükkkel lehet elérni, hogy a lapátszám felének megfelelő számú gerjesztési anyagmodellt veszünk fel a material library-ban, és mindegyikre más értékű gerjesztőáramsűrűséget adunk meg. Az adott szimulációban (és a későbbi szupravezetős modellben is) 15°-onként vettem fel ezeket az értékeket a modellnek megfelelően.

a mellékelt táblázat tartalmazza az egyes menetekre megadott áramsűrűség értékeket:

állás	fok	rad	sin	réz gerjesztés [A/mm ²]
1	15	0,261799	0,258819	1,294094158
2	30	0,523598	0,5	2,499998085
3	45	0,785398	0,707106	3,53553156
4	60	1,047197	0,866025	4,330124808
5	75	1,308996	0,965926	4,829627701
6	90	1,570795	1	5
7	105	1,832594	0,965926	4,829631135
8	120	2,094393	0,866026	4,330131442
9	135	2,356193	0,707108	3,535540942
10	150	2,617992	0,500002	2,500009575
11	165	2,879791	0,258821	1,294106973
12	180	3,14159	0	0
13	195	3,403389	-0,25882	-1,294081342
14	210	3,665188	-0,5	-2,499986595
15	225	3,926988	-0,7071	-3,535522179
16	240	4,188787	-0,86602	-4,330118174
17	255	4,450586	-0,96592	-4,829624267
18	270	4,712385	-1	-5
19	285	4,974184	-0,96593	-4,829634569
20	300	5,235983	-0,86603	-4,330138076
21	315	5,497783	-0,70711	-3,535550324
22	330	5,759582	-0,5	-2,500021066
23	345	6,021381	-0,25882	-1,294119789
24	360	6,28318	0	0

3.17. ábra: Szinuszos gerjesztés esetén a gerjesztőáramok értékeinek táblázata

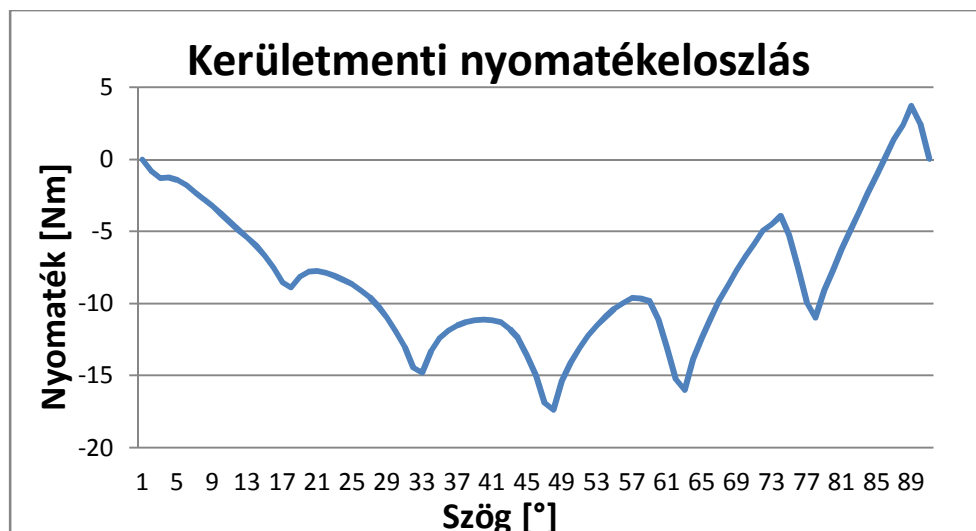
3.3.1 Két lapátos szinuszmezős elrendezés



3.18. ábra: A szinuszmezős gerjesztés erővonalképe stabil és instabil egyensúlyi állapotban

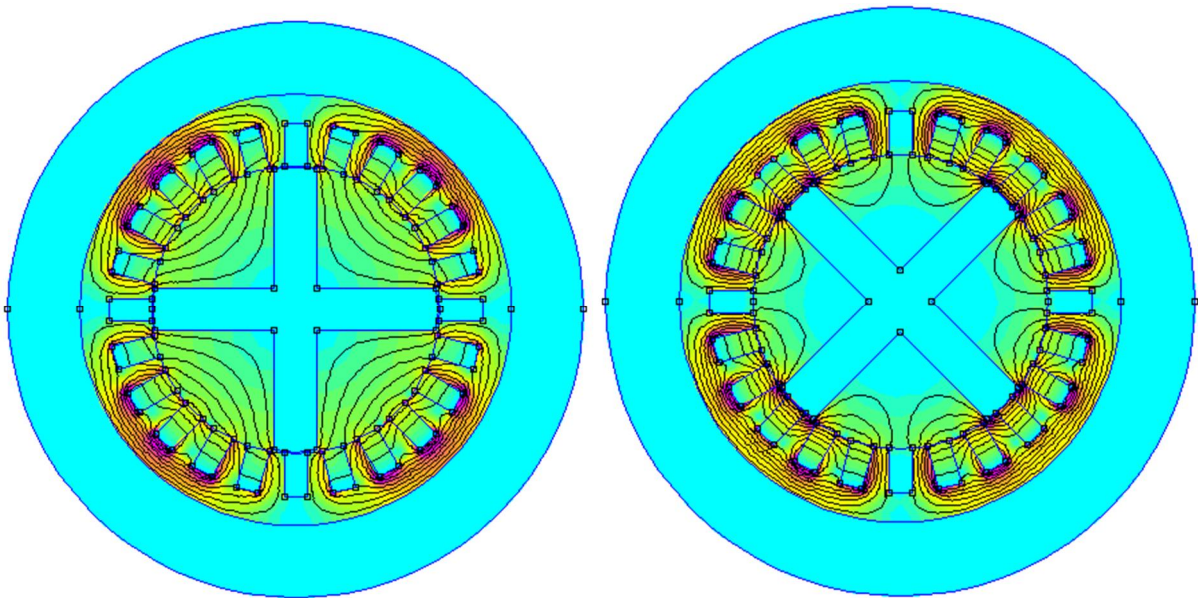
Látható, hogy a szupravezető körül az erővonalkiszorító hatás miatt elhajlanak az erővonalak, tőle távolabb azonban gyakorlatilag homogénnek tekinthető térerősség alakul ki. A párhuzamos erővonalkép azonban csak egyensúlyi állapotban jellemzi a konstrukciót, változatlan gerjesztés mellett a rotort mechanikailag elforgatva alaposan eltorzul az erővonalkép. A torz erővonalak viszont kiegyenesedésre törekednek, és ez az, ami a nyomatékot szolgáltatja. „Mágneses szélkakas” elv: ahogy a szélkakas a szél irányába áll be, úgy áll be a szupravezető rotor is, mert az erővonalak párhuzamosan szeretnek haladni mellette.

Nyomatékgörbe:



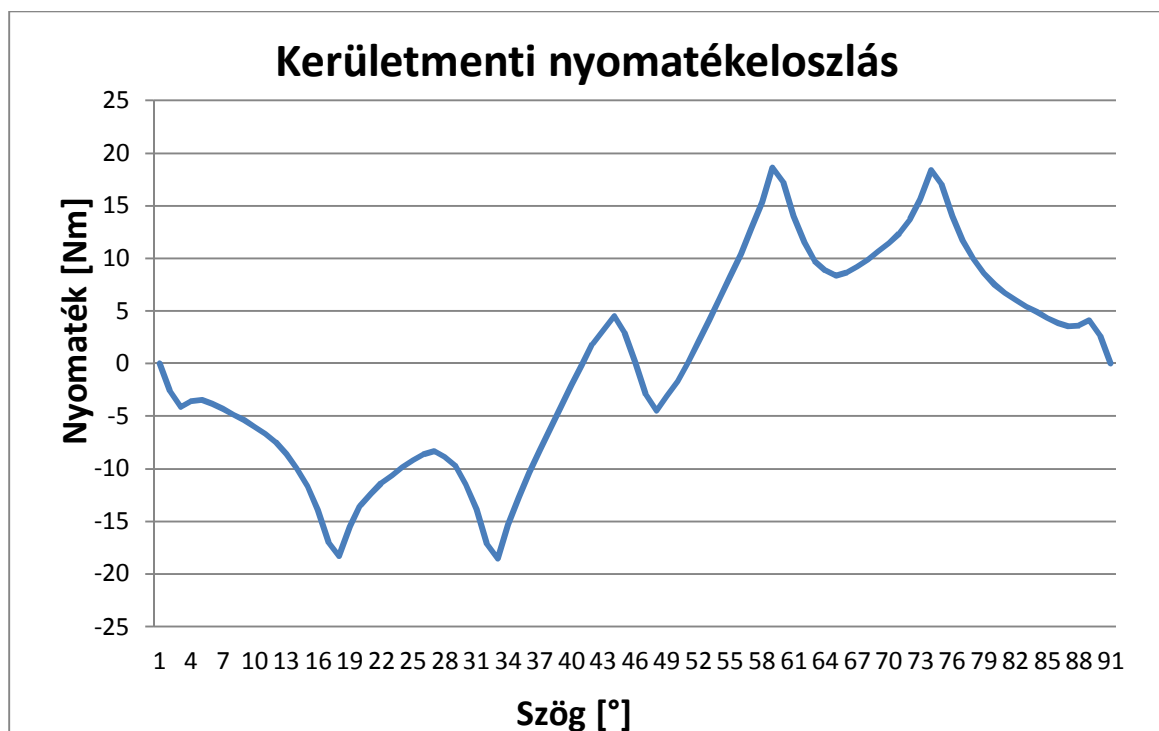
3.19. ábra: Szinuszmezős gerjesztés nyomatékgörbéje

3.3.2 Négy lapátos szinuszmezős elrendezés



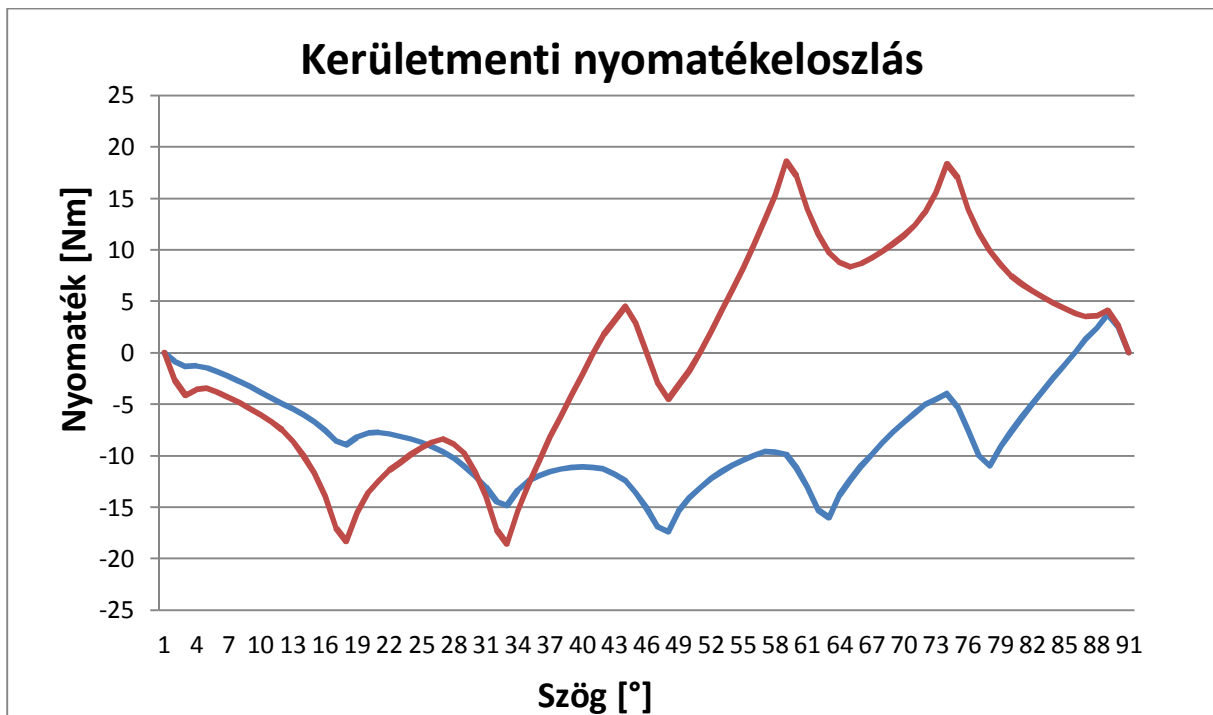
3.20. ábra: Négy lapátos szinuszmezős elrendezés erővonalképe stabil és instabil egyensúlyi állapot esetén

Nyomatékgörbe:



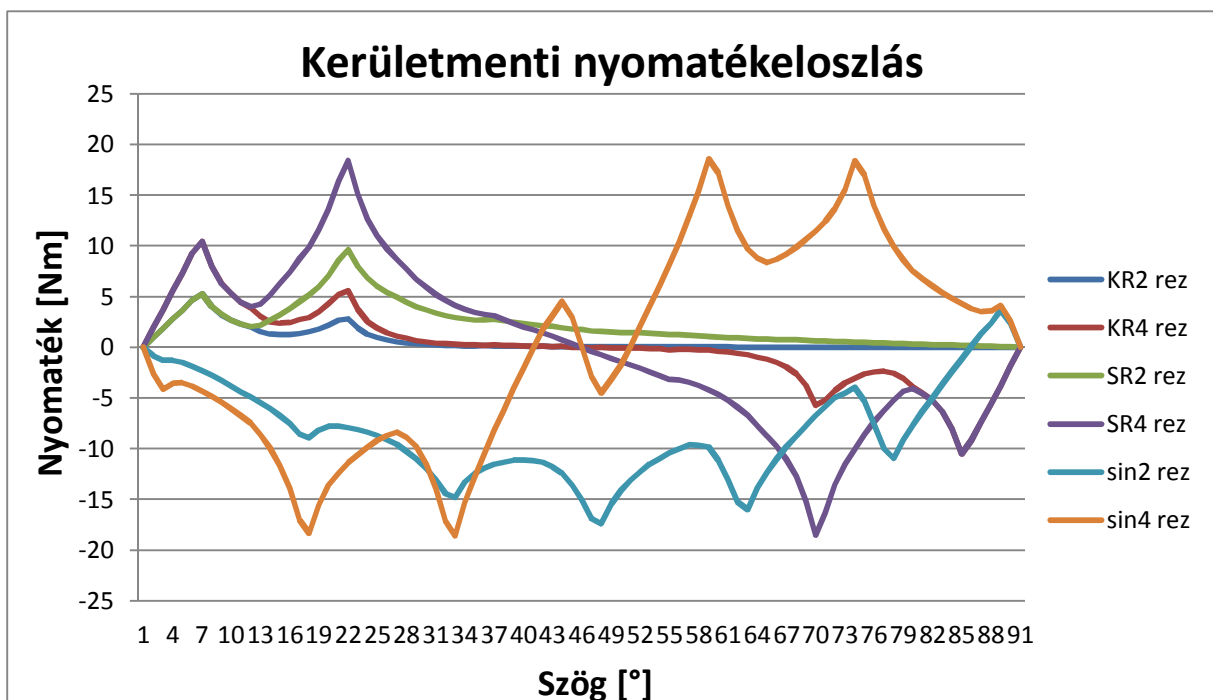
3.21. ábra: Szinuszos gerjesztésű, négy lapátos gép nyomatékgörbéje

3.3.3 Nyomatékok összehasonlítása:



3.22. ábra: Réz állórésztekerceslésű, szinuszos gerjesztésű két (kék) és négy (piros) lapátos gépek nyomatékgörbéi

3.3.4 Réz sztátorú gépek nyomatékainak összehasonlítása:



3.23. ábra: Réz állórésztekerceslésű gépek nyomatékgörbéi

4 Szupravezető tekercs a sztátorban:

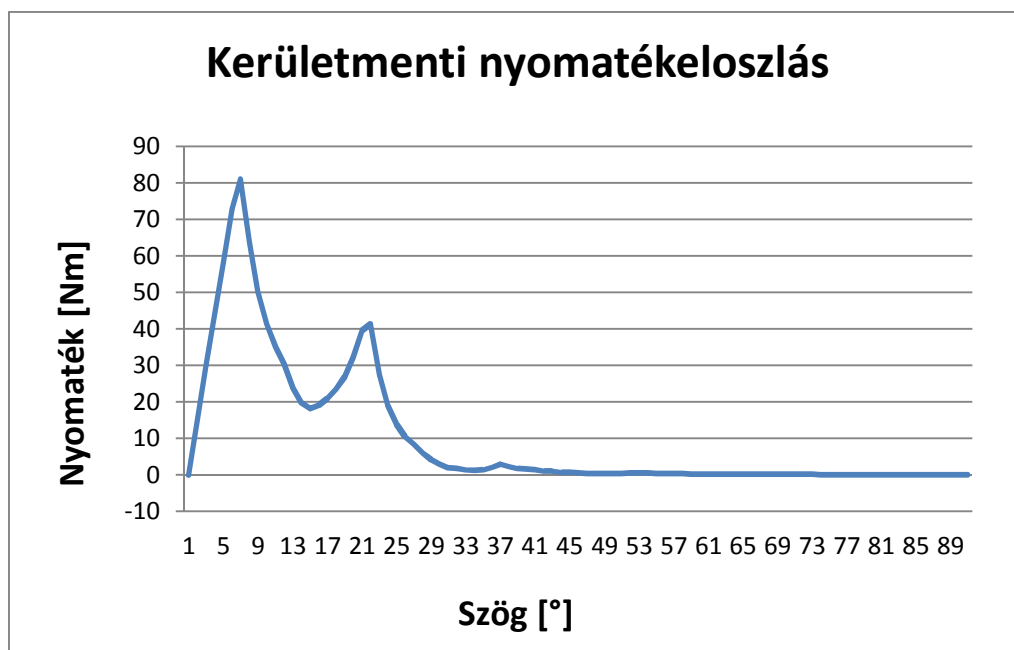
Ezen szimulációk esetében a sztátor tekercselése szupravezető anyag, tehát nagyobb felületi áramsűrűséget is elvisel, mint a réz, ennek megfelelően 20 A/mm^2 értéket adtam meg. Ez lehetőséget ad arra, hogy nagyobb nyomatékot érjünk el a QDM-mel. Azért fontos szupravezető tekercseléssel foglalkozni, mert kellően nagy tér esetén a vasmagot elhagyhatjuk, és ezzel egy potenciális veszteségforrást kiiktatunk a rendszerből, ennek főleg a később bemutatott tárcsa motornál lehet jelentősége.

4.1 Kapcsolt reluktancia jellegű gép

A gerjesztés módja egyezik a 3. pontban leírttal, csak annyi a különbség, hogy itt négyszeresére növeltem a megadott áramsűrűséget. ezen kívül lényeges különbség még a szimulációkban, hogy a gerjesztetlen állórésztekercseknek is szupravezető anyagmodellt adtam meg, ez annyiban befolyásolja a szimulációt, hogy az erővonalak elvileg nem tudnak áthatolni az állórész tekercselésen.

4.1.1 Két lapátos elrendezés

Az elrendezés teljesen azonos a 3.4.ábrán bemutatottal, ezért itt nem mellékeltem ábrát. A nyomatékgörbét vizsgálva azt az érdekesség tapasztalható, hogy a négyszeresére növelt áramsűrűség hatására durván tizenhatszoros nyomatéknövekedés tapasztalható, tehát az árammal négyzetesen növekszik.

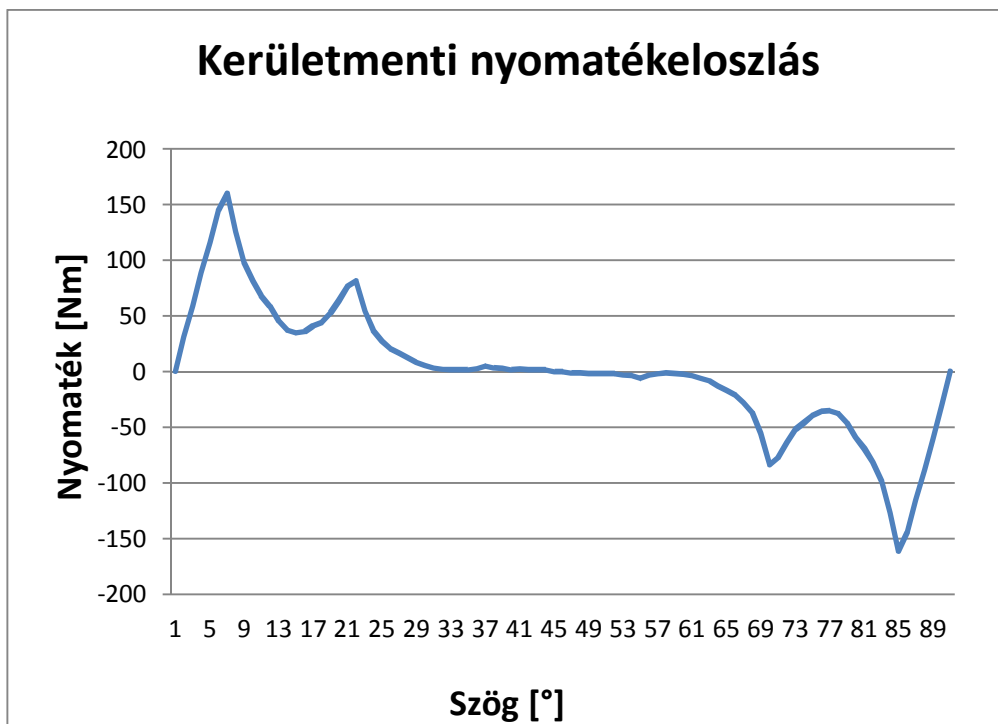


4.1. ábra: Két lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

4.1.2 Négy lapátos elrendezés:

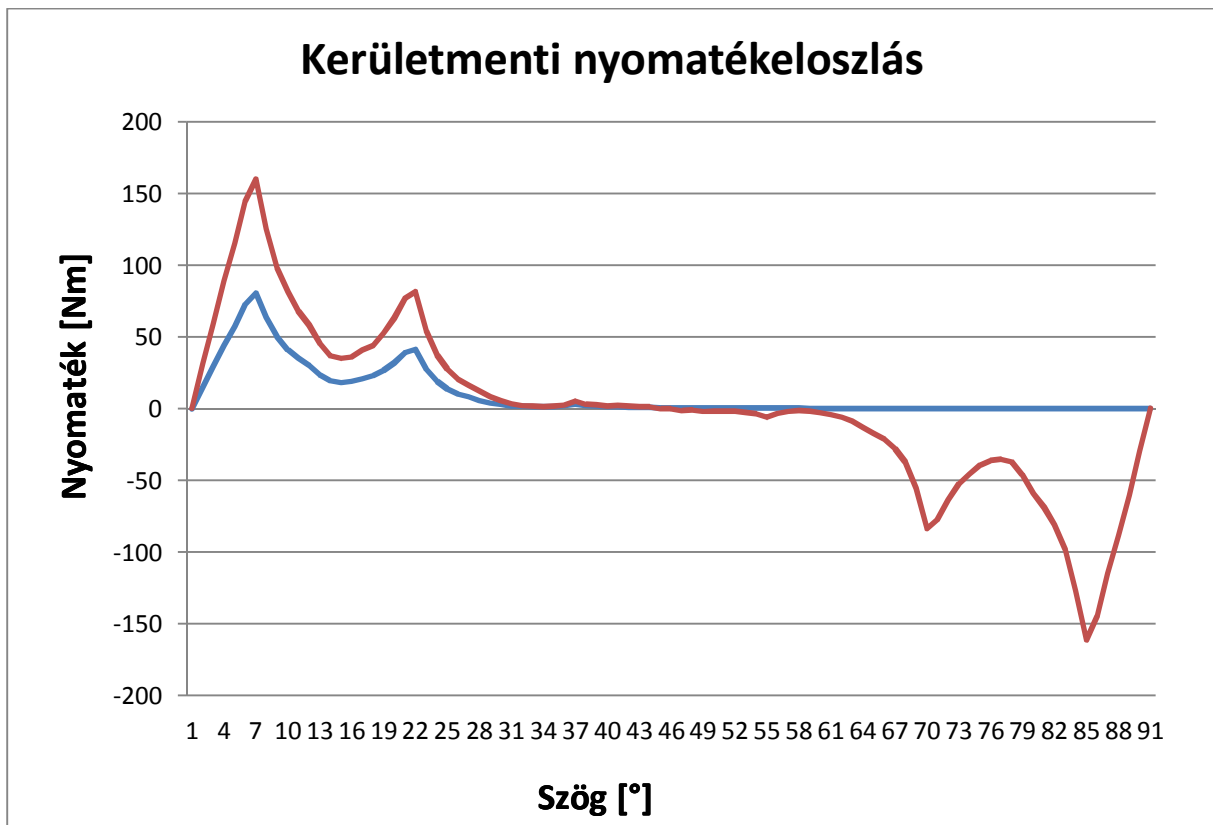
Az elrendezés ebben a pontban azonos a 3.6.ábrán bemutatottal, ezért itt nem tüntetem fel még egyszer. Az előző konstrukció (réz sztátortekercselésű) négy lapátos változata, nyomatéknövekedésre, és lassító nyomaték erőteljesebb, és fázisban korábban bekövetkező hatására kell számítani a korábbi verzióhoz képest. Hasonlóan a két lapátos kialakításhoz, itt is durván tizenötszörös nyomatéknövekedés tapasztalható.

Nyomatékgörbe:



4.2. ábra: Négy lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

4.1.3 Nyomatékgörbék összevetése:



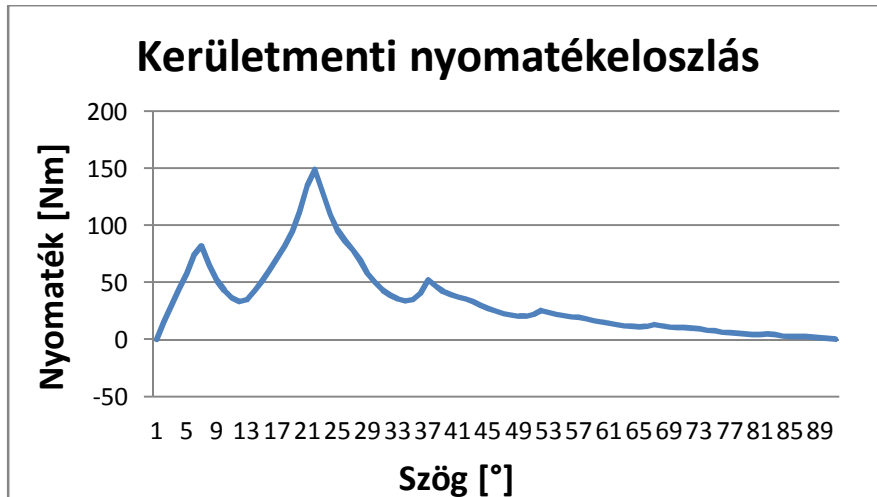
4.3. ábra: Két (kék) és négy (piros) lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

Noha a jelentősebb axiális méretekkel rendelkező konstrukciónál nem indokolt ilyen jellegű gerjesztés, futtattam le a szimulációt két és négy lapátos kialakítással, és a vártnak megfelelően csekély nyomatékot képez. Külön kiemelném, hogy a hasznos gerjesztési utat is csökkenti, mert hamarabb képződik ellentétes irányú nyomaték a lapát közeledtével. Ezen gerjesztéskialakítás nem hozza a megfelelő nyomatékot, és feleslegesen drága megoldás szupravezető tekerccseléssel, ezért ezen vizsgált konstrukcióról tartom a legkevésbé elképzelhetőnek, hogy valaha is túllépjen az elméleti vizsgálatokon, inkább a következő pontban bemutatott elosztott tekerccselésű megoldást emelném ki.

4.2 Elosztott tekercselésű gép

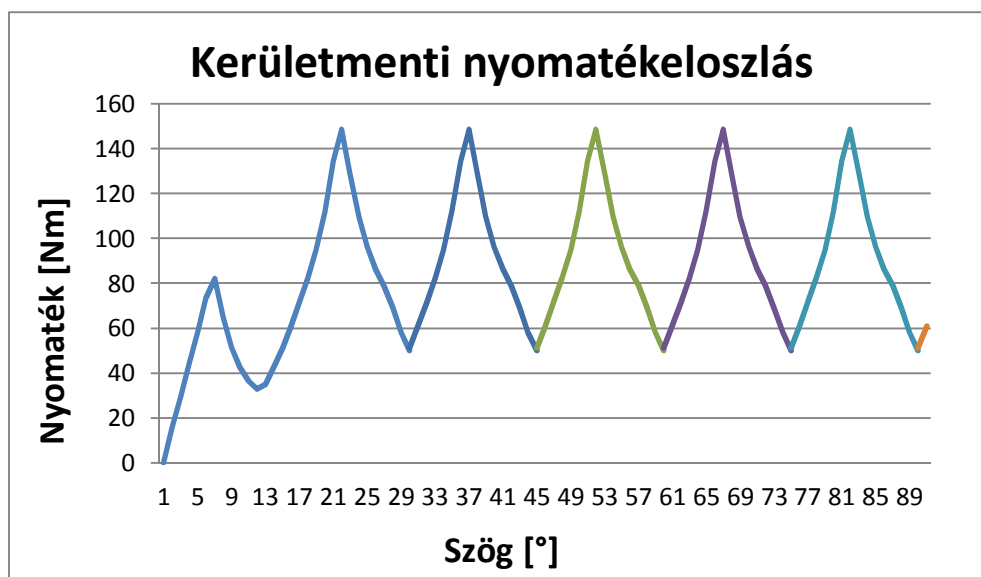
4.2.1 Két lapátos elrendezés

A kialakítás és az erővonal szerkezet azonos a 3.12. ábrán bemutatottal, azonban a gerjesztőáram növelésével itt is tizenhatszoros nyomatéknövekedés érhető el.



4.4. ábra: Két lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

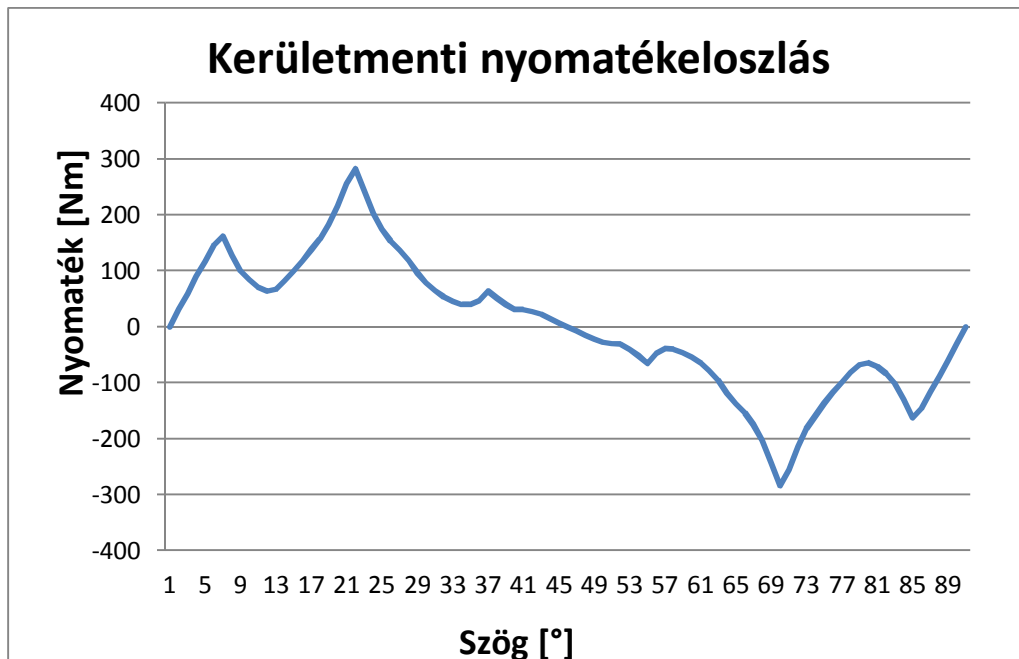
A nyomatékgörbéből látható, hogy a nyomatékcúcs akkor keletkezik, amikor a rotor 22° -ot zár be a gerjesztett lapáttal, tehát ha folytonos üzem esetén csak ennek a tartománynak a közelében ($\sim \pm 7^\circ$) gerjesztenénk az állórész lapátokat, akkor folyamatosan nagy nyomatékot tudnánk elérni, azonban jelentős lenne a nyomatéklüktetés.



4.5. ábra: Folytonos üzem esetén a rákapcsolt impulzusgerjesztés okozta nyomatéklüktetés

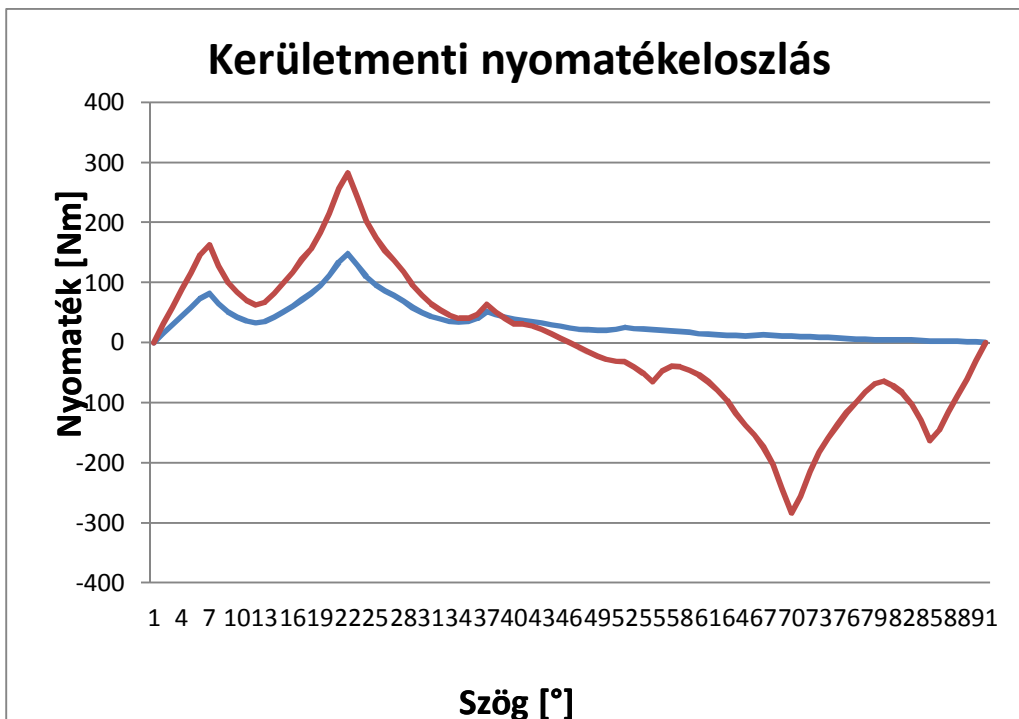
4.2.2 Négy lapátos elrendezés:

Az elrendezés azonos a 3.14.ábrán bemutatottal. A pólusok kétszerezése miatt a nyomaték is kétszer nagyobb, mint az előző esetben.



4.6. ábra: Négy lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

4.2.3 Nyomatékok összehasonlítása:



4.7. ábra: Két (kék) és négy (piros) lapátos elrendezés nyomatékgörbéi

4.3 Szinuszmezős gerjesztés:

A különböző tekercsmeneteket a szimulációnál különböző anyagmodellekkel vettem figyelembe, melyekre egyenként megadtam az adott szöghelyzethez tartozó áramsűrűség értékeket az alábbi táblázat szerint:

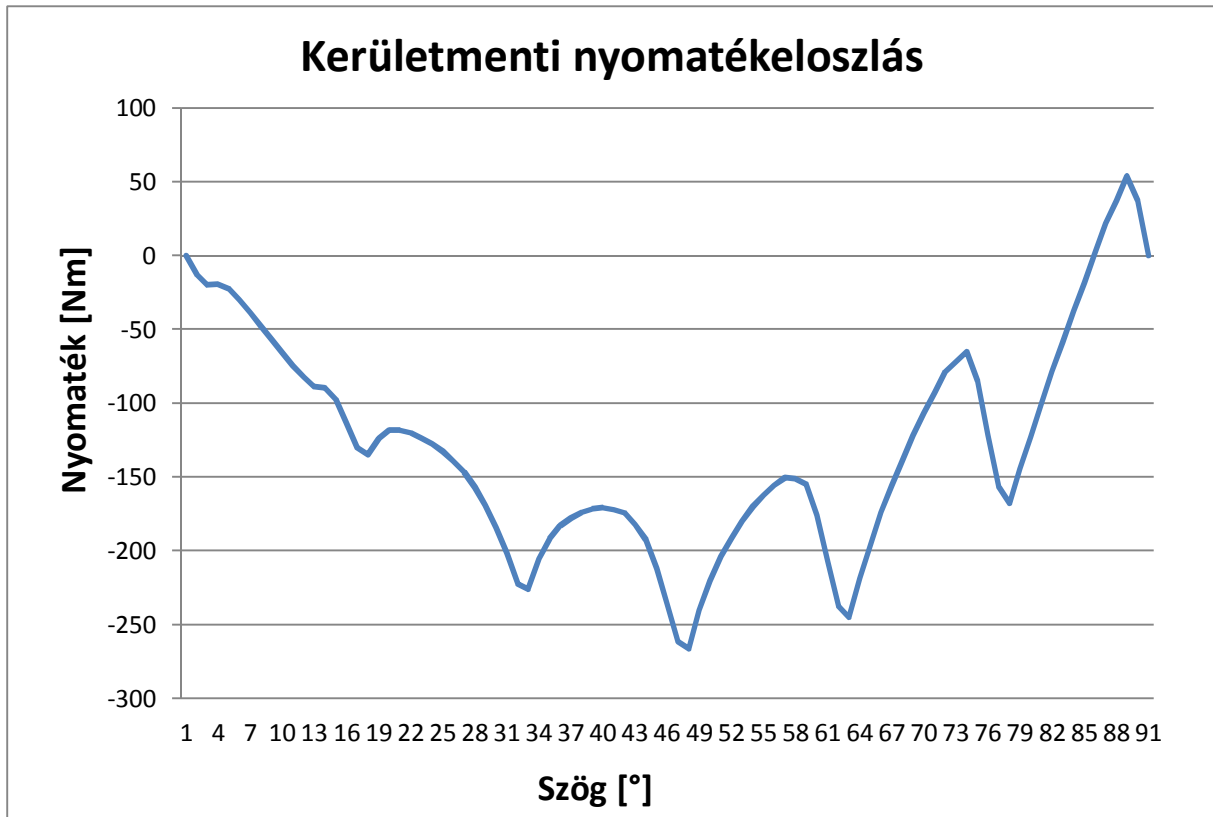
állás	fok	rad	sin	szupra gerjesztés [A/mm ²]
1	15	0,261799	0,258819	5,17637663
2	30	0,523598	0,5	9,99999234
3	45	0,785398	0,707106	14,14212624
4	60	1,047197	0,866025	17,32049923
5	75	1,308996	0,965926	19,3185108
6	90	1,570795	1	20
7	105	1,832594	0,965926	19,31852454
8	120	2,094393	0,866026	17,32052577
9	135	2,356193	0,707108	14,14216377
10	150	2,617992	0,500002	10,0000383
11	165	2,879791	0,258821	5,176427894
12	180	3,14159	0	0
13	195	3,403389	-0,25882	-5,176325367
14	210	3,665188	-0,5	-9,999946378
15	225	3,926988	-0,7071	-14,14208871
16	240	4,188787	-0,86602	-17,32047269
17	255	4,450586	-0,96592	-19,31849707
18	270	4,712385	-1	-20
19	285	4,974184	-0,96593	-19,31853827
20	300	5,235983	-0,86603	-17,3205523
21	315	5,497783	-0,70711	-14,1422013
22	330	5,759582	-0,5	-10,00008426
23	345	6,021381	-0,25882	-5,176479157
24	360	6,28318	0	0

4.8. ábra: A kerület menti gerjesztőáramok táblázata

4.3.1 Két lapátos elrendezés

Az elrendezés és az erővonalkép azonos a 3.18. ábrán bemutatottal. A fentebb leírt szinuszmezős gerjesztést szupravezető tekercsekkel megvalósítva lehetőség nyílik 20 A/mm^2 áramsűrűséggel vizsgálni a motor nyomatékát.

nyomatékgörbe:



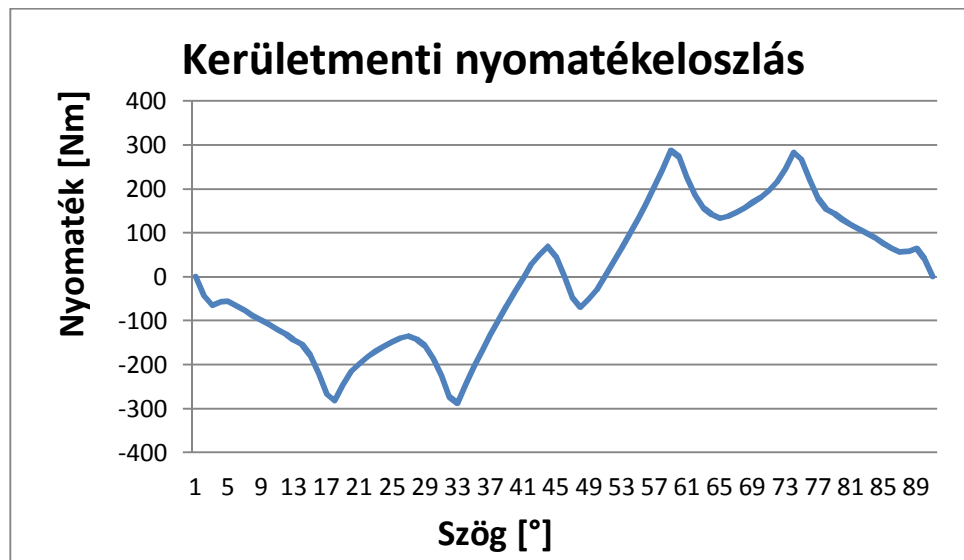
4.9. ábra: Szinuszmezős gerjesztés, két lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

Látható, hogy a nyomaték ezen gerjesztésnél negatív irányban növekszik, ennek oka a referenciairány megválasztása, ugyanis itt az egyensúlyi állapotból indítottam a szimulációt és innen közelítettem az instabil egyensúlyi állapot felé. A görbén megjelenő hullámosság a lapátok helyzetét rajzolja ki, negatív csúcs esetén szemben vannak az állórész pólussal.

Ezen a ponton fel kell hívnom a figyelmet a szimuláció egyik alapvető hiányosságára: Bár szupravezető anyagot modellezünk, a végeselemes szoftver nem képes kezelni a nulla permeabilitást, tehát egy nagyon kis értéket adtam meg az anyag modellezésénél. Mivel ezáltal nem nulla a permeabilitás, az erővonalak – a mellékletben található animációkon jól láthatóan - képesek behatolni a szupravezető anyagba, míg a valóságban nem ez történik.

4.3.2 Négy lapátos eset:

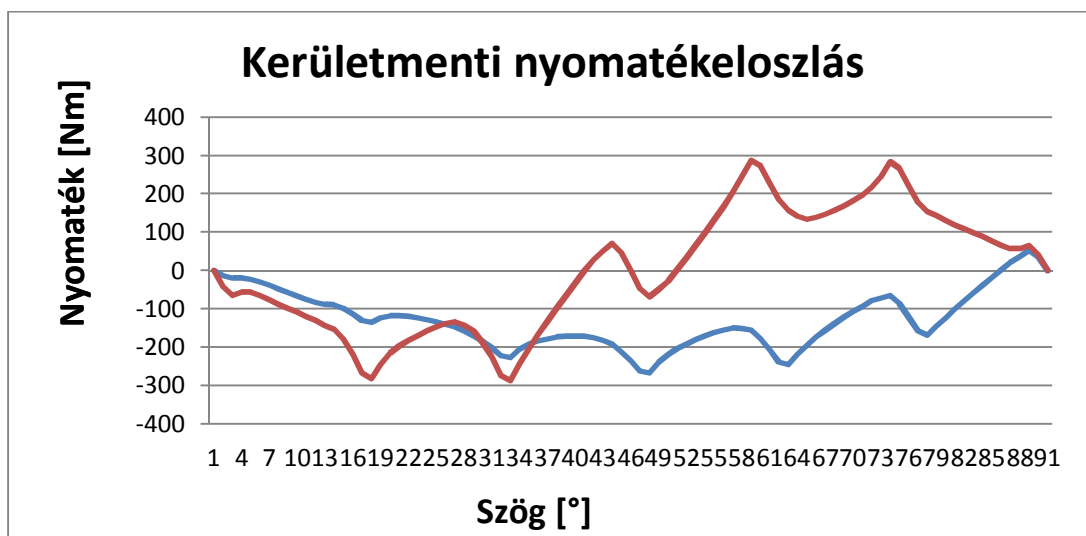
Az elrendezés és az erővonalkép megegyezik a 3.20. ábrán bemutatott képpel.



4.10. ábra: Szinuszműködésű gerjesztés, négy lapátos elrendezés nyomatékgörbéje

Látható a nyomatékgörbén, hogy a nyomatékcúcs nagyságrendileg egyezik az elosztott tekercselésű gépnél ismertetett nyomatékkal, tehát főleg a kerület mentén mindenhol gerjesztést adni az állórészre, ezzel nem tudjuk tovább növelni a nyomatékot.

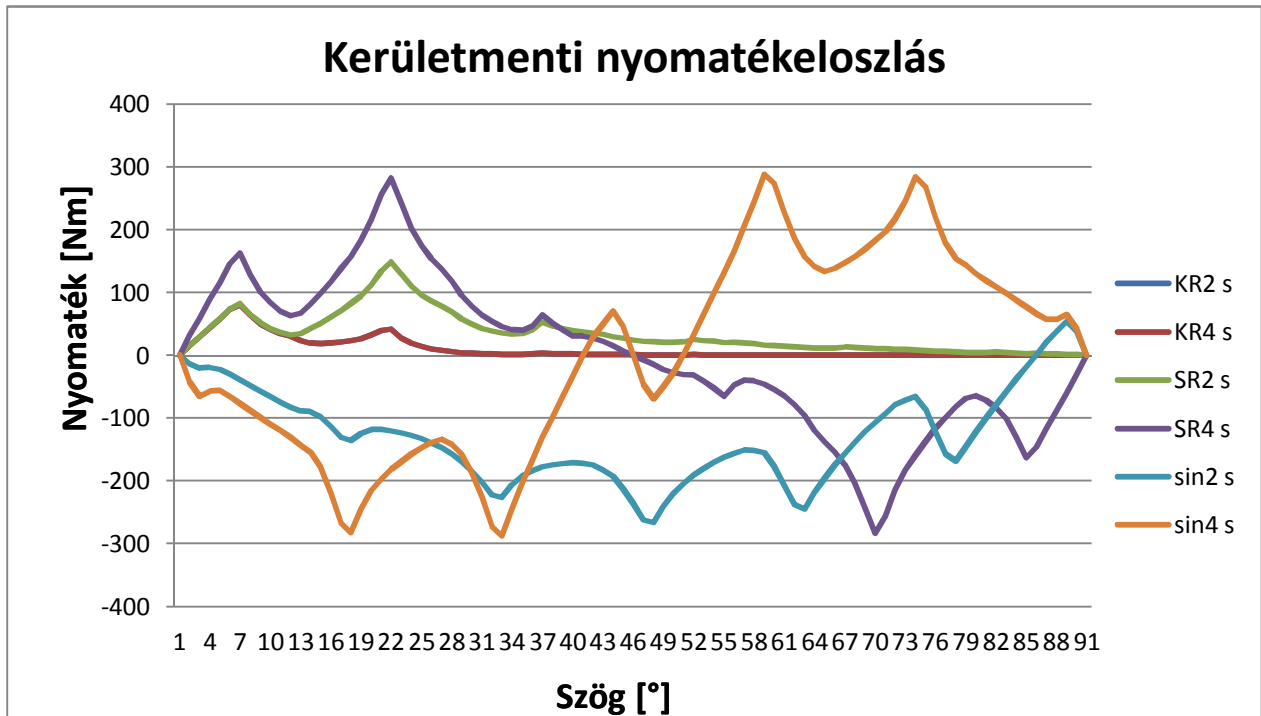
4.3.3 Szupravezető állórésztekercselésű, szinuszos gerjesztésű gépek nyomatékának összehasonlítása:



4.11. ábra: Két (kék) és négy (piros) lapátos elrendezés nyomatékgörbéi

Négy lapát alkalmazása nem növeli számottevően a nyomatékot, a csúcserők szinte egyeznek.

4.4 Szupravezető állórésztekerceslésű gépek nyomatékainak összehasonlítása:



4.12. ábra: Nyomatékgörbék összevetése

Ezen a diagramon egyszerre ábrázoltam valamennyi általam vizsgált szupravezető állórésztekerceslésű gép nyomatékgörbéjét.

Megállapítható, hogy:

- **A kapcsolt reluktancia jellegű gép kisebb maximális nyomatékot tud létrehozni,** mivel a toroidális mező fékező tulajdonságai lerontják a gép hatásfokát.
- **Felesleges szinuszos gerjesztést alkalmazni,** ugyanis nem növeli számottevően a nyomatékot, csak potenciális veszteséget viszünk a rendszerbe.
- **A legcélszerűbb az elosztott tekerceslésű gép gerjesztésének alkalmazása,** amennyiben a gerjesztéseket csak ilyen oldalról különböztetjük meg.

5 Alternatív elrendezésű gépek:

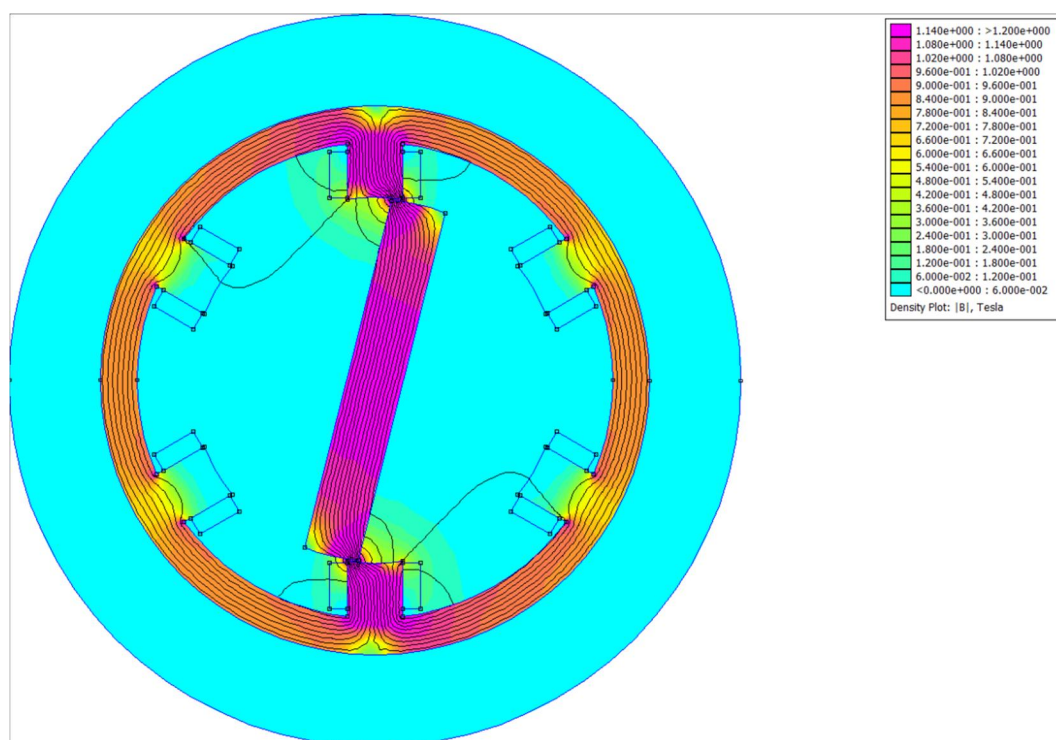
5.1 Patkómotor bevezetése

A mágneses erővonalak alakját figyelembe véve megfigyelhető az eddig vizsgált gépeknél, hogy a fluxusvonalak túl nagy része szóródik szét a légrésben, a ténylegesen hasznosítható, egy helyre koncentrált aktív fluxus csak töredéke a kialakulónak, ezért érdemes összevetni az erővonalak efféle mintázatát a hagyományos reluktancia gépekben fellépő fluxusszálak alakjával, hogy levonhassuk a megfelelő következtetéseket.

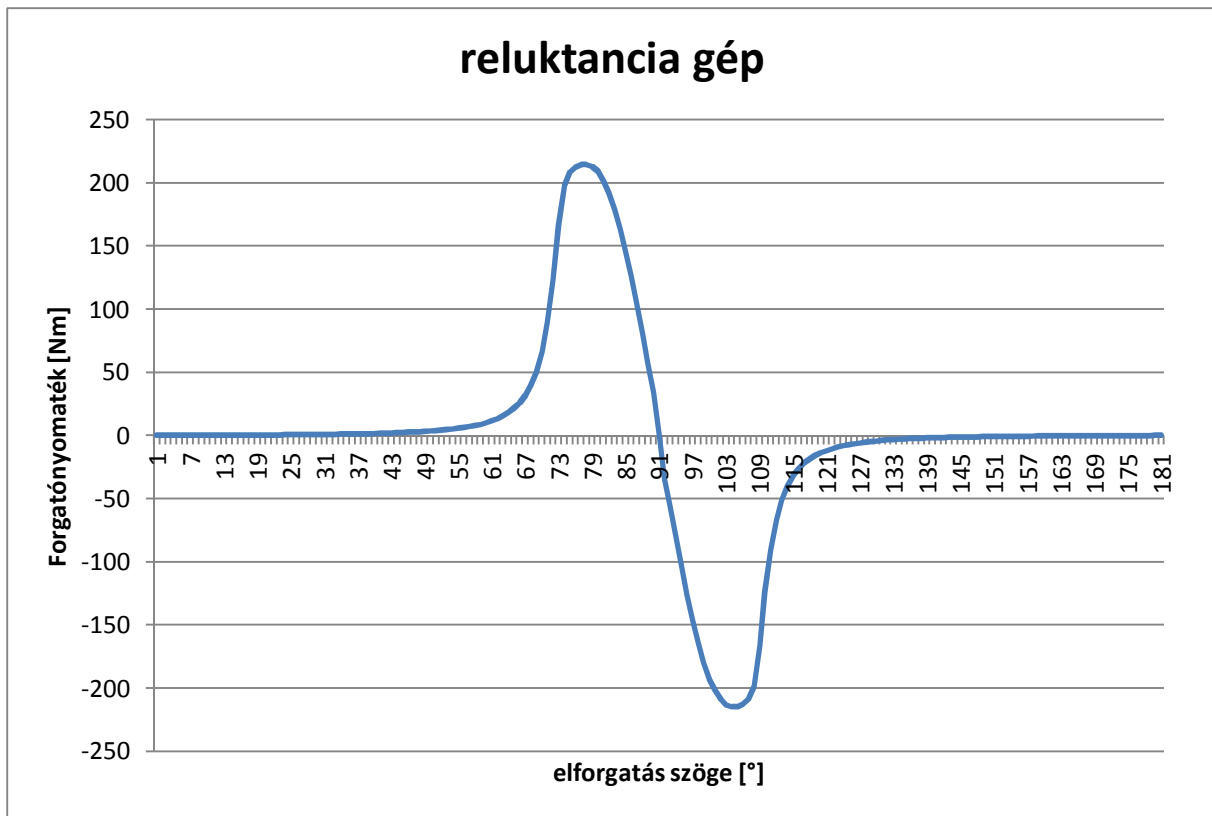
Ezért szimuláltam le egy hagyományos reluktancia gépet is a FEMM-ben, és hogy nagyságrendileg összevethető eredményeket kapjak, az alapkoncepció státorát használtam azonos gerjesztéssel.

5.1.1 Hagyományos reluktancia gép modellezése:

A hagyományos reluktancia gépet, mint ahogy az alábbi ábra mutatja, olyan gerjesztéssel is vizsgáltam, ahol szintén a 12 és a 6 óránál lévő tekercseket gerjesztettem, de a korábbi szimulációkkal ellentétben itt a forgórész nem szupravezető, hanem acél, így az erővonalak a forgórészen és a koszorún keresztül záródnak a stabil egyensúlyi helyzetben. (Megjegyzés, az alábbi ábrán a maximális nyomatékhoz tartozó helyzetet emeltem ki, nem pedig a stabil egyensúlyi helyzetet. A maximális nyomaték 214,667 Nm)



5.1. ábra: Hagyományos reluktancia gép gerjesztése

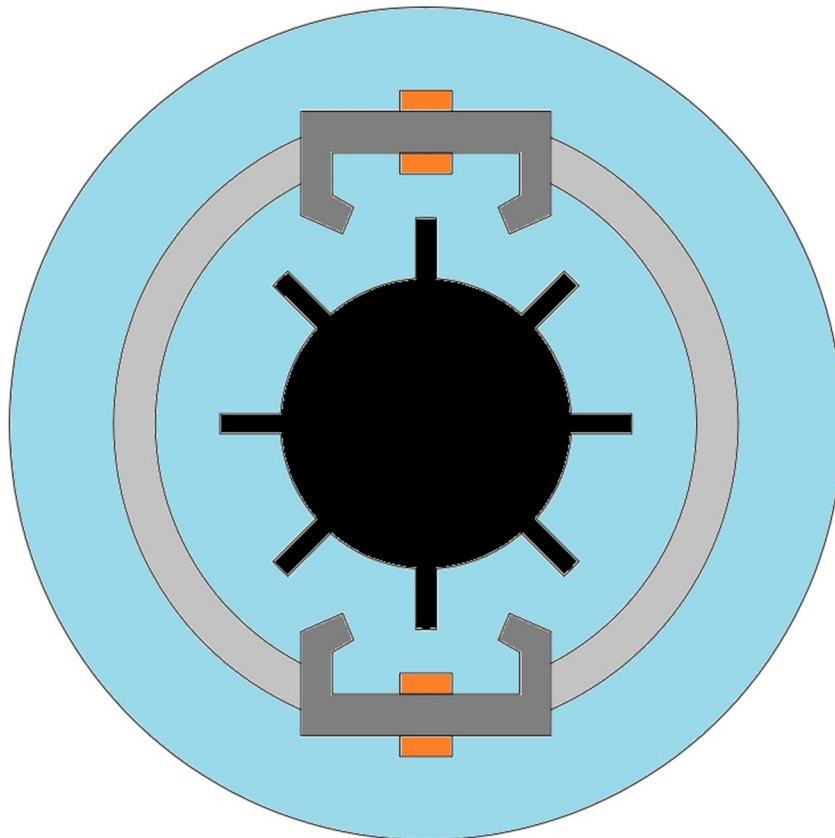


5.2. ábra: Hagyományos reluktancia gép nyomatékgörbéje

Ezen fluxusmintázatok tanulmányozása közben értettem meg igazán, hogy tulajdonképpen miért nem jó az alapkonstrukciónk:

1. A sztátorban lévő acél koszorú eltéríti a mágneses teret, és a gerjesztés nem csak a légrés, hanem az acél gerjesztésére is fordítódik, ami a nyomatékképzés szempontjából haszontalan. → **Nem kell acélkoszorú a sztátorban, csak annyi acél kell a tekercsmagba, amennyi a mágneses teret közvetlenül a lapátokra vezeti.**
2. Ha az erővonalak már a légrés előtt kilépnek az acélból, akkor a légrésnél lecsökken a fluxussűrűség, ami kisebb keletkező nyomatékot eredményez → olyan konstrukció kell, ami biztosítja, hogy az erővonalak csak a légrésben koncentrálódjanak → **Nagyobb fluxussűrűség kell, „C”-vasmagot kell használni.**
3. Növelni kell az aktív felületet. A fluxusvonalnak a lapátokra merőlegesen kéne haladnia, hogy tangenciális erőt képezve nyomatékot fejtsen ki → **Az erőtér terület menti nagy változására van szükség.**

Ezen következtetések alapján egy, az alapkonstruktóiótól merőben eltérő összeállításra lesz szükség:

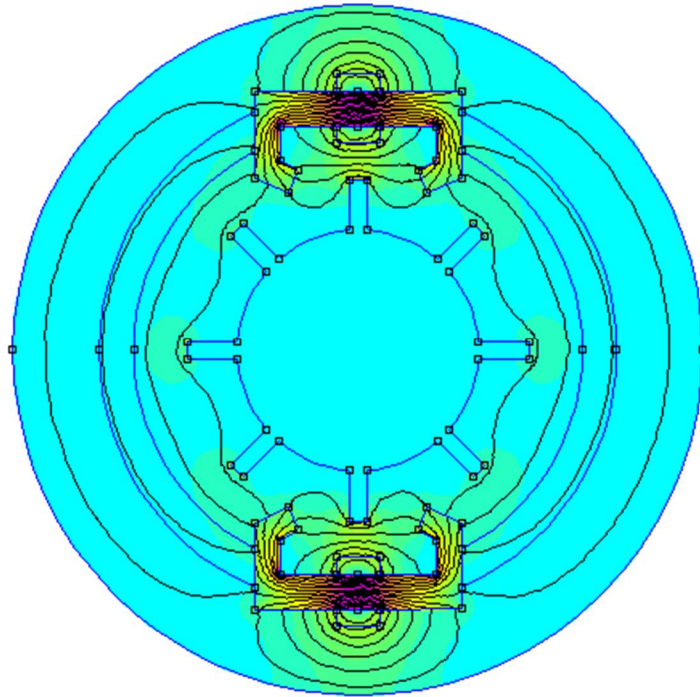


5.3. ábra: Patkómotor elvi vázzata lapátkerék alakú forgórészsel

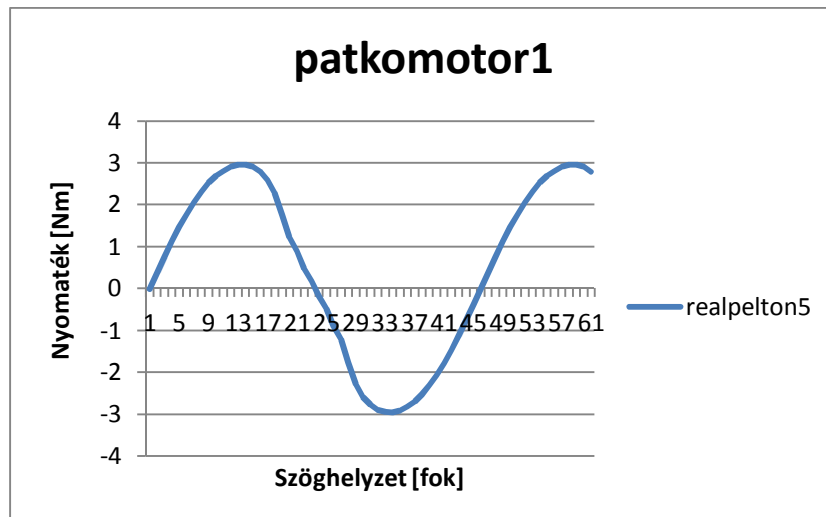
Magyarázat: az előző szimuláció kapcsán érdemes felismerni, hogy ha nagy fluxussűrűséget szeretnénk, akkor nem indokolt a közös vasmag az állórészen, hanem a kerület mentén elhelyezett több kisebb patkó alakú maggal hatékonyabb lehet a párhuzamos fluxusvonalak létrehozása.

5.1.2 Patkómotor vizsgálata

Az alábbi ábrán a véges elemes szimuláció egy kiragadott képét mutatom be, amelyen szemléltetem, hogy hogyan működik a patkómotor. Kiválóan látható, hogy az erővonalak homogén elrendeződésre törekednek, de a rotor ezt sérti, ezért az erőtér végül kiszorítja a lapátot a légrézből.



5.4. ábra: Patkómotor erővonalképe



5.5. ábra: Patkómotor nyomatékgörbéje

A patkómotor ezen konstrukciójának nyomatéka a kerület mentén szinuszos eloszlású, a konstrukció további vizsgálatokat igényelne, **de nem hatékony**, a következő pontban ismertetem ennek az okát.

5.2 Rotorra ható erők vizsgálata a fluxusszálak kitérítése közben

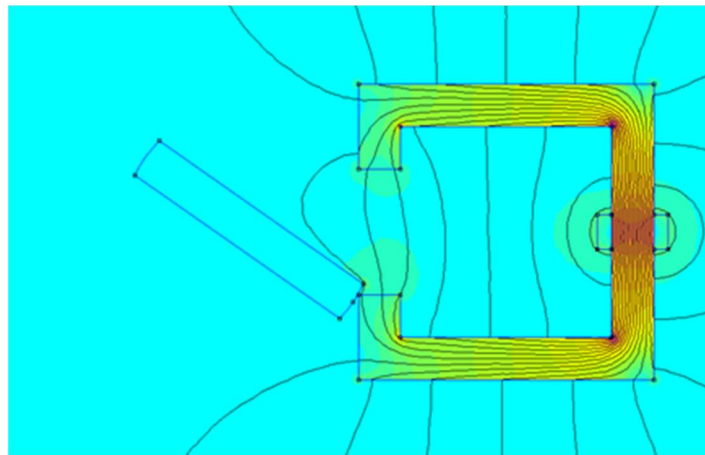
A patkómotor vizsgálata során felmerült bennem, hogy bár nyomatékgörbéje ideális alakú, a fluxusszálak lapátkiszorító hatása nem csupán tangenciális irányú kitérítő erő

formájában jelentkezhet, hanem radiális irányú, a lapátot nagymértékben roncsoló erő formájában is.

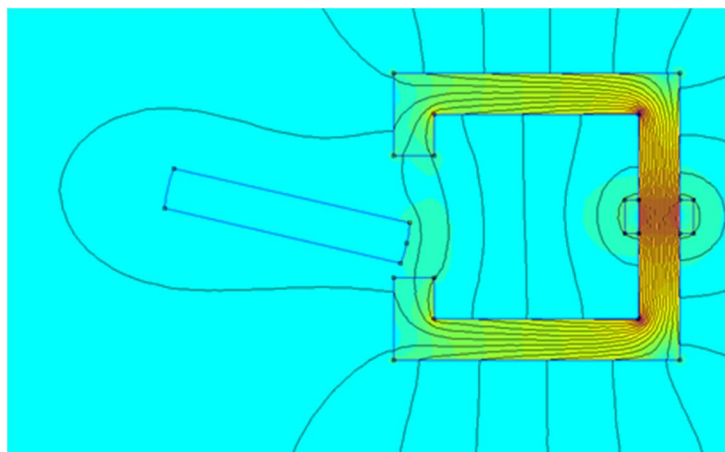
Ezen pontban azt vizsgálom, hogy egyetlen lapátra miként hatnak az erők, ha egy „C”-vasmag közelében forgatom. A translációs mozgástól nagyobb erőt várok.

Az előző pont indokolja a szimuláció szükségességét, ugyanis egyáltalán nem az ideálisnak megfelelő nyomatékok adott eredményül a második patkómotoros szimuláció.

Az alábbiakban néhány kép segítségével illusztrálom, minként változik a fluxusvonalak alakja a lapát légrésbe forgatásával:



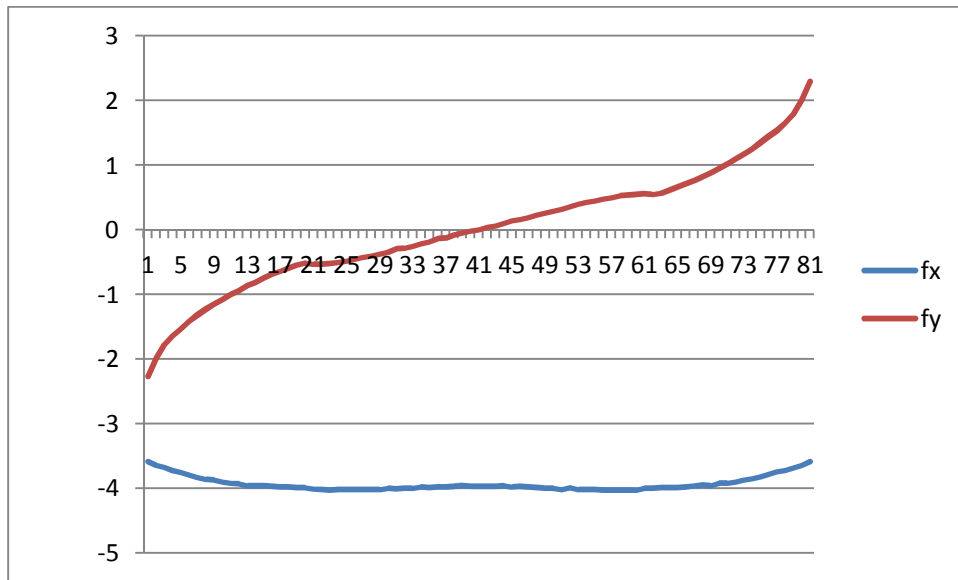
5.6. ábra: Lapát beforgatása a légrésbe (-40°)



5.7. ábra: Lapát beforgatása a légrésbe (-35°)

A szimulációban azt vizsgáltam, hogy milyen arányban áll egymással a lapátra függőleges, illetve vízszintes irányban ható kitérítő erő, és azt tapasztaltam, hogy a függőleges

komponens amit a patkómotor nyomatókképzésre használ, sokkal kisebb, tehát arra kéne törekedni, hogy a fontosabb vízszintes komponenst is képesek legyünk felhasználni nyomatókképzésre.



5.8. ábra: A lapátra ható függőleges és vízszintes irányú erők

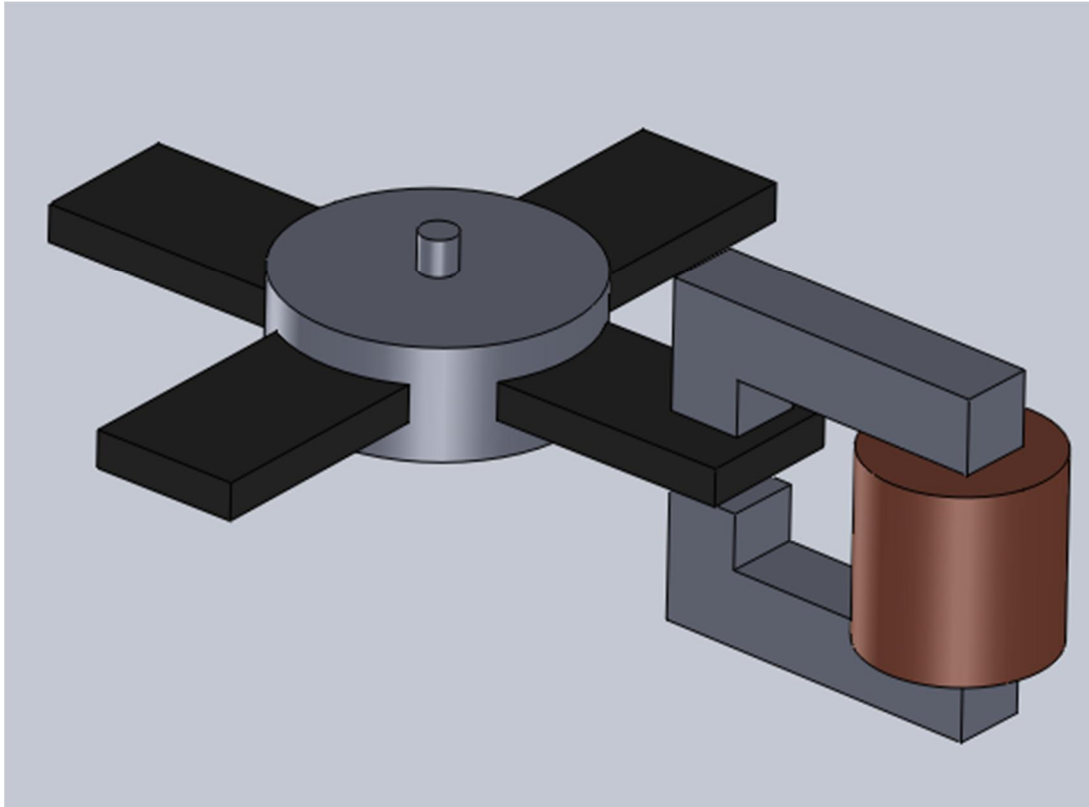
Az eredmények kiértékelése:

- **A szinuszos nyomatókot kifejtő tangenciális erő csak kis szakaszon lép fel tehát a hasznos szakasz csak töredéke a sztátor légrés hosszának, rossz a hatásfoka.**
- **A radiális erő nagyobb a tangenciálisnál, ezt kell felhasználni nyomatókképzésre!**

Ezen észrevételek vezettek el a következő pontban ismertetett tárcsa alakú kialakításhoz.

6 Új konstrukció: tárcsa elrendezés

Az előző szimuláció eredményeit felhasználva az ott radiális irányban ébredő erők felhasználására az alábbi elrendezést vázoltam:

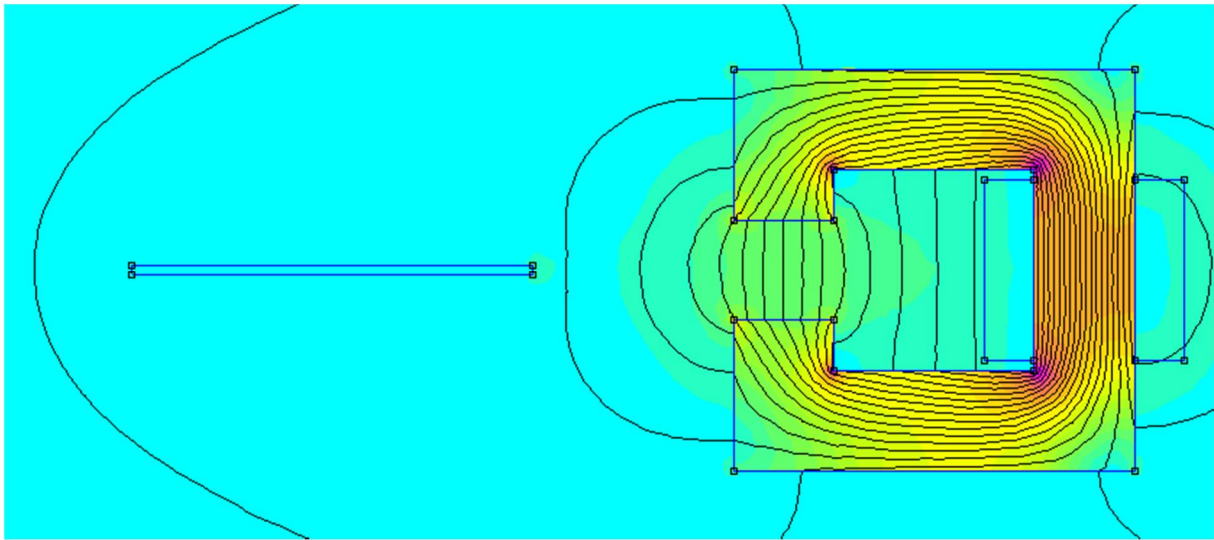


6.1. ábra: A tárcsamotor elvi konstrukciója

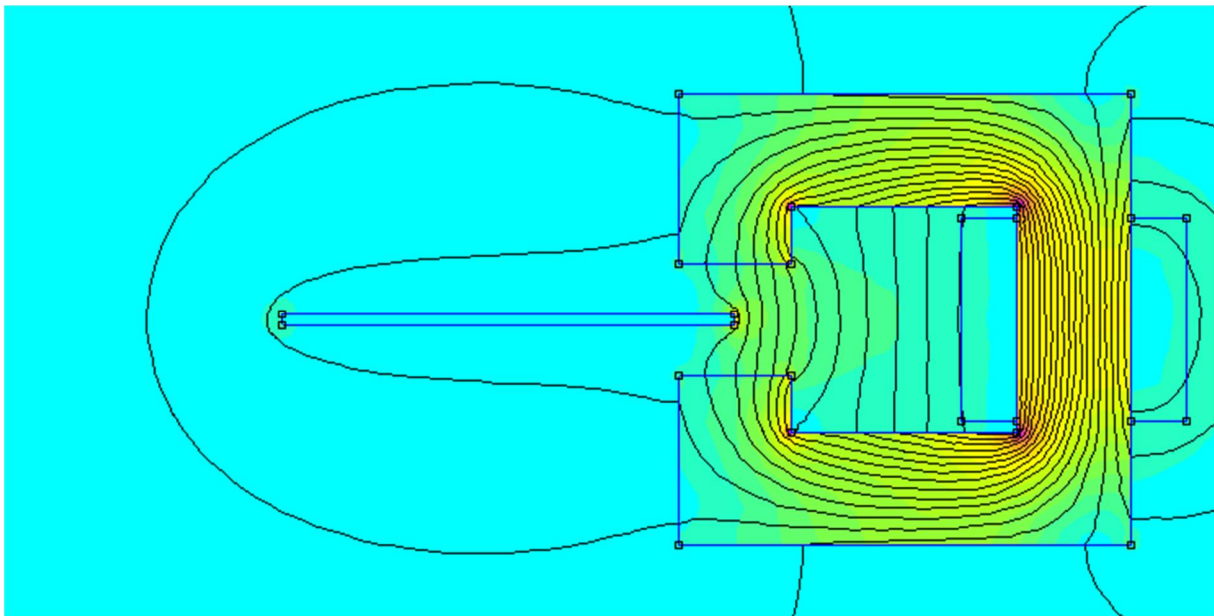
Azért ezt a megoldást vizsgálom részletesebben, mert ennek a legegyszerűbb a felépítése, és egy kísérleti modell szintjén, amin már nyomaték is mérhető, ezt tartom a legegyszerűbben megvalósíthatónak.

A működési elv a következő: a korábban radiális irányban ébredő erőt használok nyomatékképzésre, vagyis 90°-kal elforgatom a vasmagot a korábbi elrendezéshez képest, tehát a lapátok az axiális irányú erővonalakat metszik a légrésben, és az így kapott tangenciális nyomaték már a domináns részét képezi a gerjesztés okozta erőhatásnak.

Ezen tangenciális irányú erő alakulását rengeteg újabb szimuláció segítségével vizsgálom, mely ugyan torzít olyan tekintetben, hogy nem háromdimenziós modellen történt a vizsgálat, azonban betekintést nyerhetünk a légrés centrumához transzlációsan közelített lapátra ható erők alakulásába:

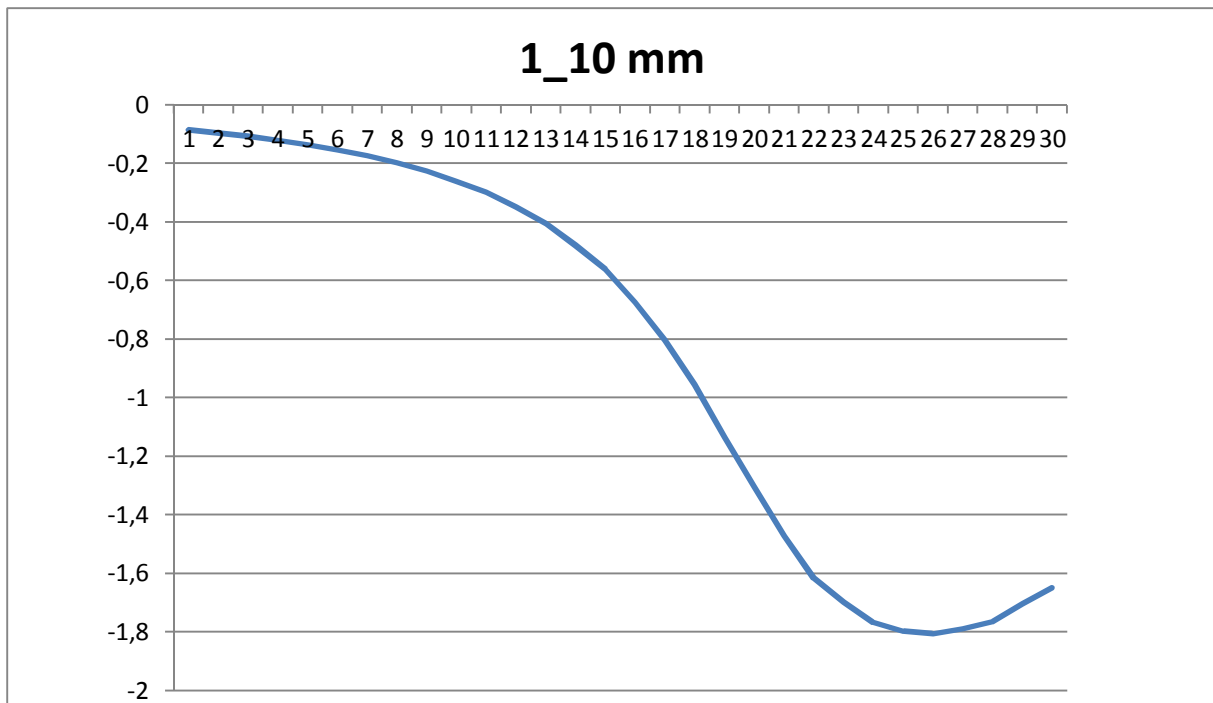


6.2. ábra: Szupravezető közelítése, az erővonalak enyhén torzulnak



6.3. ábra: Szupravezető közelítése, az erővonalak erősen torzulnak

Ezen pontban azt vizsgálom, hogy milyen erők ébrednek a szupravezetőben, ha egy „C” vasmag légréséhez közelítem. Az erőgörbe alapján egy adott szakaszon egy közönséges mechanikai laprugóval modellezhető a jelenség, vagyis a távolsággal nagyjából lineárisan változik az erő.



6.4. ábra: A szupravezetőre ható x tengely irányú erő a légréstől mért távolság függvényében

A tárcsa elrendezés azért célszerű, mert így a gerjesztés által létrehozott erővonalak görbülése irányítottá válik, és csak egy irányba - a nekünk megfelelő irányba - mozgatja a rotort.

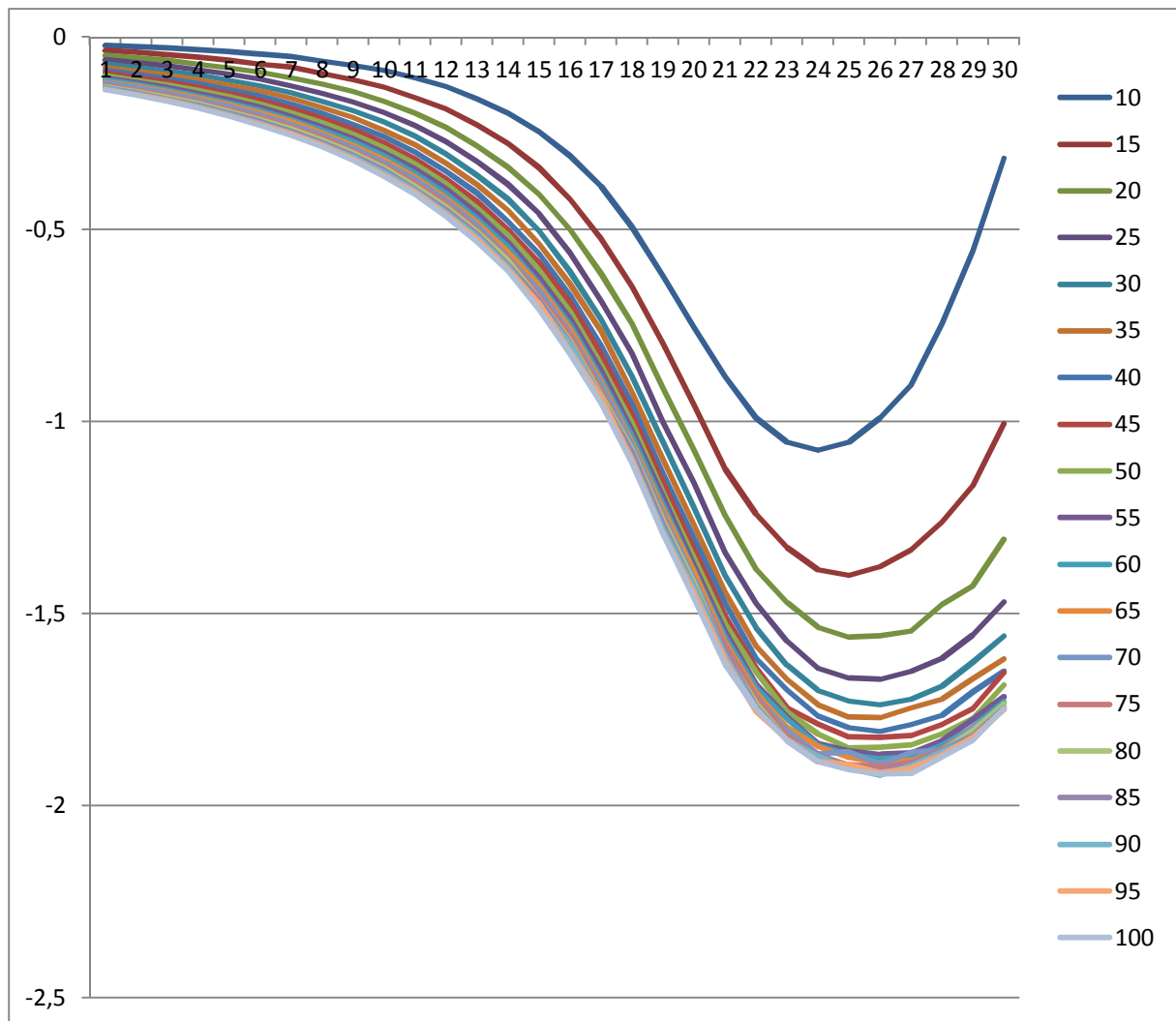
Gyakorlatilag olyan a nyomatékképzés, mintha egy megfeszített íj lőne ki egy vesszőt, csak itt a húr az indukcióvonal, az íj a c vasmag, a nyíl pedig a rotorlapát. Ez a változat kísérleti modell szinten hamarosan megvalósításra kerül a szupravezető laboratóriumban.

A továbbiakban azt vizsgáltam, hogy az összeállítás egyes paramétereinek megváltoztatása miként befolyásolja a szupravezetőre ható erőt.

A vizsgált paraméterek:

- A szupravezető szalag hosszirányú mérete
- A gerjesztő tekercs áramsűrűsége
- A C-vasmag légrésének mérete

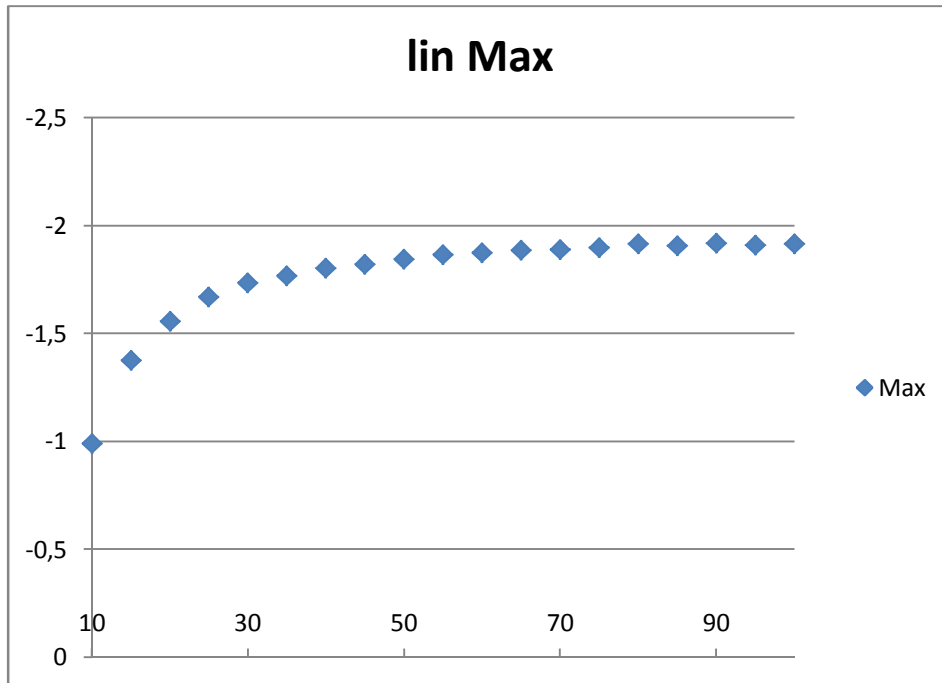
6.1 szalag hosszának változtatása:



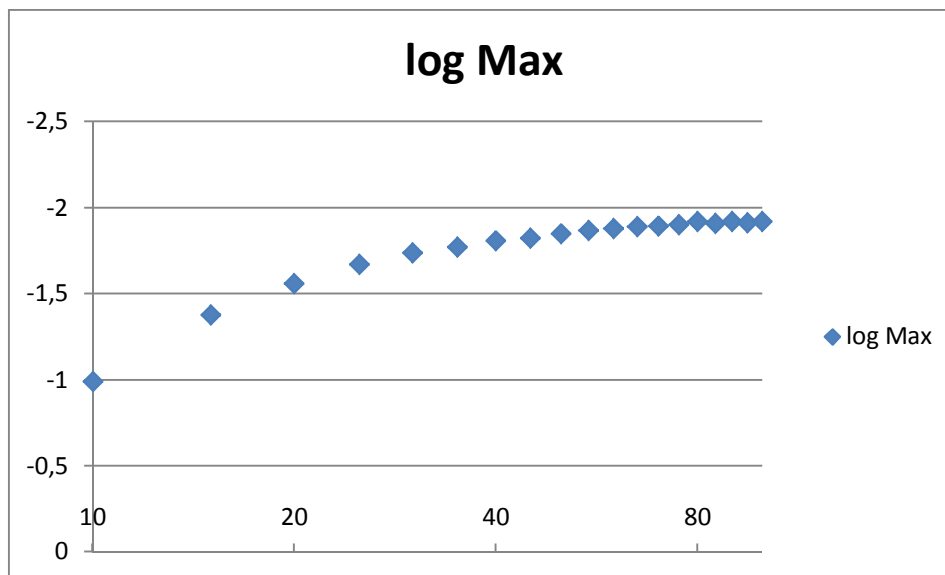
6.5. ábra: Különböző hosszúságú szupravezetőkre ható erők

A modelleket úgy építettem fel, hogy a vasmagtól 20 mm távolságra lévő 10 mm kiindulási hosszal rendelkező szupravezető szalag modelljét szimulációként 5 mm-rel hosszabbra vettem. Az egymás alatt elhelyezkedő görbék mutatják, hogy a hossz növelése növeli a szalagra ható taszító erőt.

Az alábbi ábrán a különböző hosszúságú szupravezető szalagokra a közelítés során ható maximális erőket ábrázolom a hossz függvényében. Az első diagramon lineáris, a másodikon logaritmikus a hossz skálázása.



6.6. ábra: Maximális erők megjelenítése lineáris skálázással

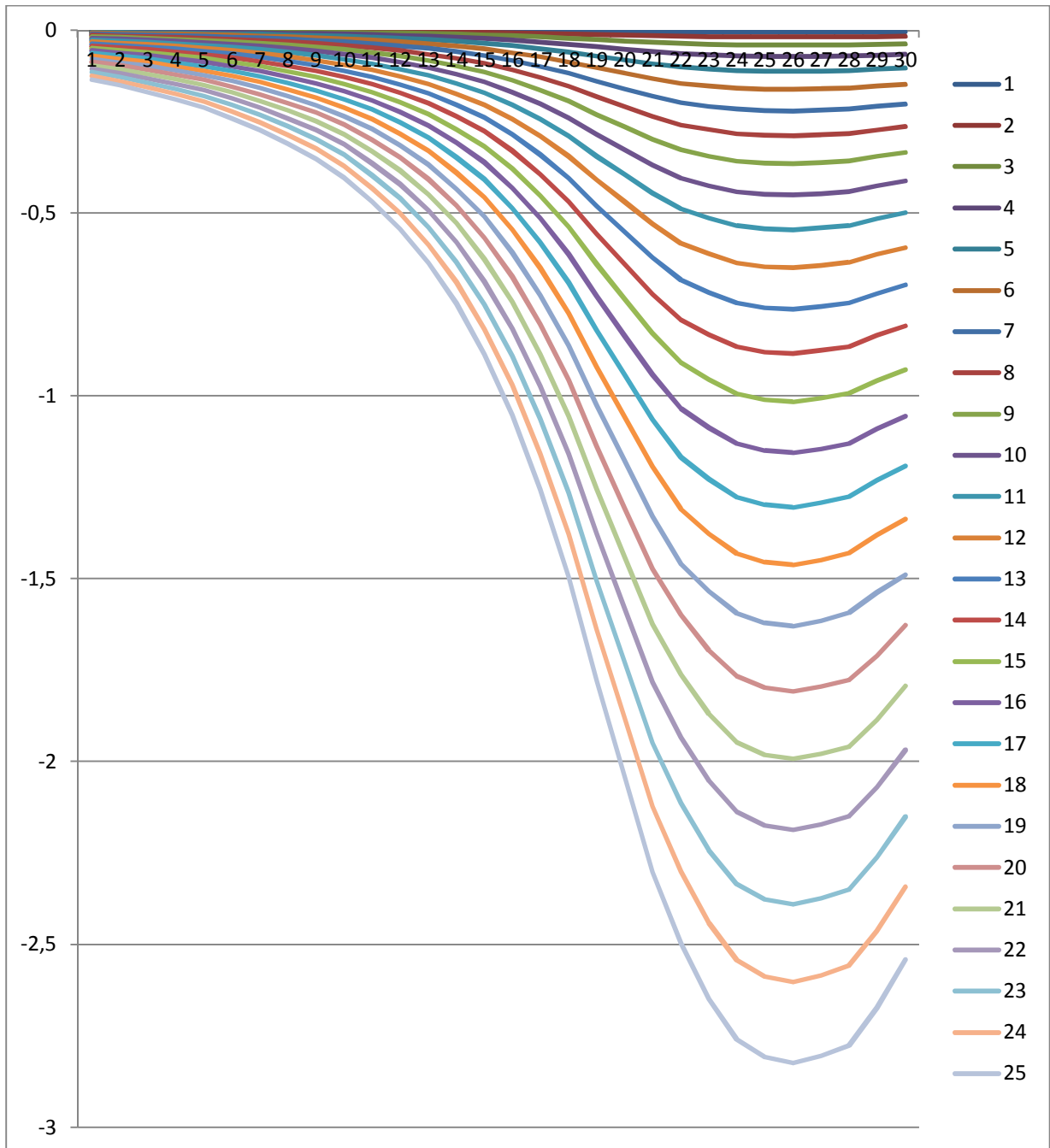


6.7. ábra: Maximális erők megjelenítése logaritmikus skálázással

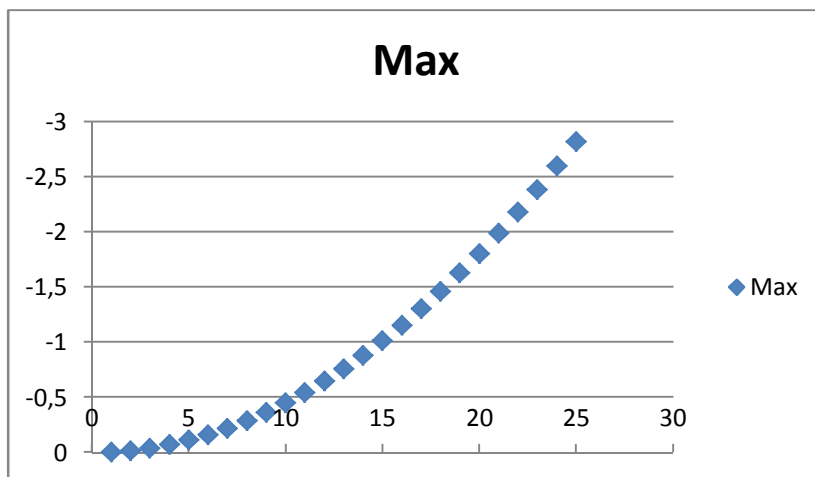
Látható, hogy a szupravezető szalag hosszának növelése növeli a kialakuló erőt, de egy bizonyos kritikus hosszon túl számottevően már nem befolyásolja a kialakult erőt, ezért valamennyi további szimulációmban 40 mm hosszúságú szalagot alkalmaztam.

6.2 A gerjesztőáram változtatása:

Ezen pontban a gerjesztésre adott áramsűrűség vektor értékét változtatom 1 A/mm^2 -től 25 A/mm^2 -ig, és azt vizsgálom, hogy ez hogyan hat a kialakuló erőre.



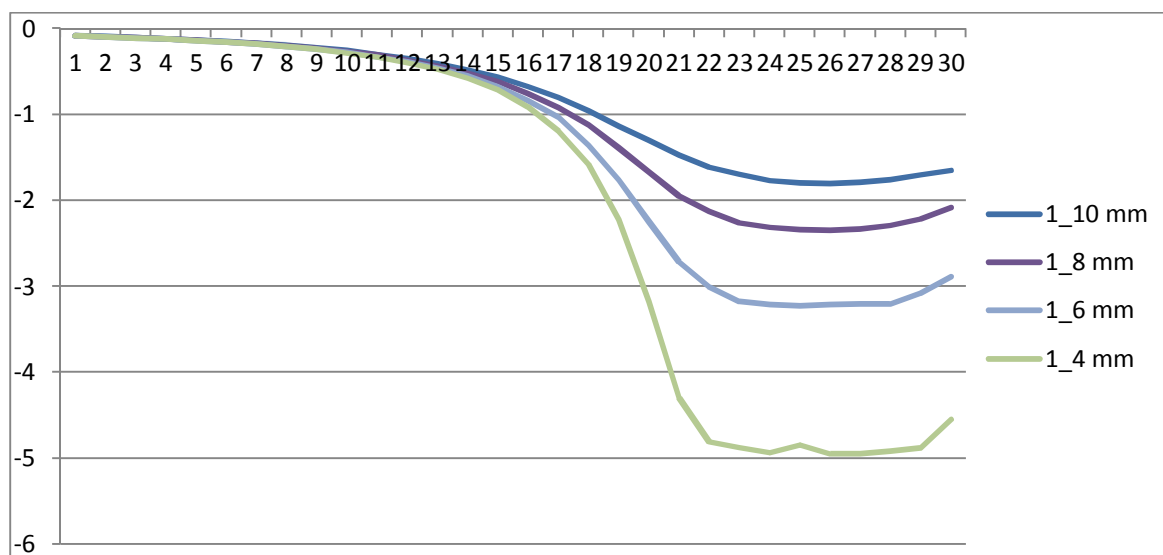
6.8. ábra: A gerjesztőáram változtatásának hatása az erőre



6.9. ábra: A gerjesztőáram növelésének hatása a kialakuló maximális erőre

A gerjesztés növelésével a maximális taszítóerő növekszik. A maximális erő alakulása jól tükrözi a négyzetes jelleget, 20 A/mm²-nél nagyobb áramsűrűséget azonban nem érdemes megengedni, inkább a menetszám növelésével érdemes a gerjesztést növelni.

6.3 Légrés méretének változtatása:



6.10. ábra: A légréshossz változásának hatása az erőre

A légrés méretét csökkentem 10 mm-ről egészen 4-ig. A taszító erő növekszik, ennek oka, hogy a vastagabb közelebb kerülő szupravezető sokkal nagyobb fluxussűrűségnek van kitéve.

Ezt a vizsgálatot a továbbiakban ki kell egészíteni 3D-s szimulációkkal is, mivel a továbbiakban átlapolással eltérő szélességűre toldott szupravezető szalagok viselkedését is szeretném tanulmányozni a „C”-vastag közelében. Ezen felül megoldást kell találni a légrés szélességének redukálására, ezt több rétegben felhasznált szupravezető szalag, vagy tömbi szupravezető felhasználásával tartom elképzelhetőnek.

7 A kísérletek bemutatása:

7.1 Szupravezető szalagos kísérlet

Az előző félév folyamán a műhely által végzett első jelentős kísérlet a szupra laborban egy lapátkereket mintázó szupravezető rotor elkészítése volt. A meghajtása állandómágnessel történt.

Összeállítás: Egy átfűrt hungarocell korong köré hajtogattunk szupravezető szalagból kialakított lapátokat, kialakítva ezáltal a szupravezető lapátkereket, majd ezt egy tengelyre felfűzve folyékony nitrogénbe helyeztük.

Állandó mágnes közelítésének hatására a lapátkerek elfordult, tehát a gyakorlat bizonyította az elméletet, a QDM működni fog a gyakorlatban is.



7.1. ábra: A képen a kísérlet összeállítása látható

7.2 Tömbi szupravezető kísérlet

A második kísérletünkben nem szupravezető szalagot használtunk, hanem tömbi szupravezetőt erősítettünk a tengelyre. (Hasonlóan a 6.1-es ábrán bemutatott rotorhoz.)

Itt már nem állandómágnest használtunk a „QDM rotor” gerjesztéséhez, hanem 3 db. vasmagos tekercset (7.2.ábra).

Kipróbáltuk 1, 2 és 3 tekercses hajtással is, és a kéttekercses változat több fordulatot is képes volt megtenni, ha éppen sikerült eltalálni a kapcsolás megfelelő pillanatát. **A kísérlet most már teljes mértékben bizonyította az elméletet, a QDM megépíthető lesz, és tekercses gerjesztéssel is működni fog.**



7.2. ábra: A képen a második kísérlet háromtekerceses összeállítása látható.

Irodalomjegyzék:

[1] Arpad Racz, Prof. Dr. Istvan Vajda: Numerical evaluation of novel high-temperature superconductor-based quasi-diamagnetic motor

[2] Arpad Racz, Andras Hadur, Prof. Dr. Istvan Vajda: Investigation of a quasi-diamagnetic machine based on high-temperature superconductor-based rotor